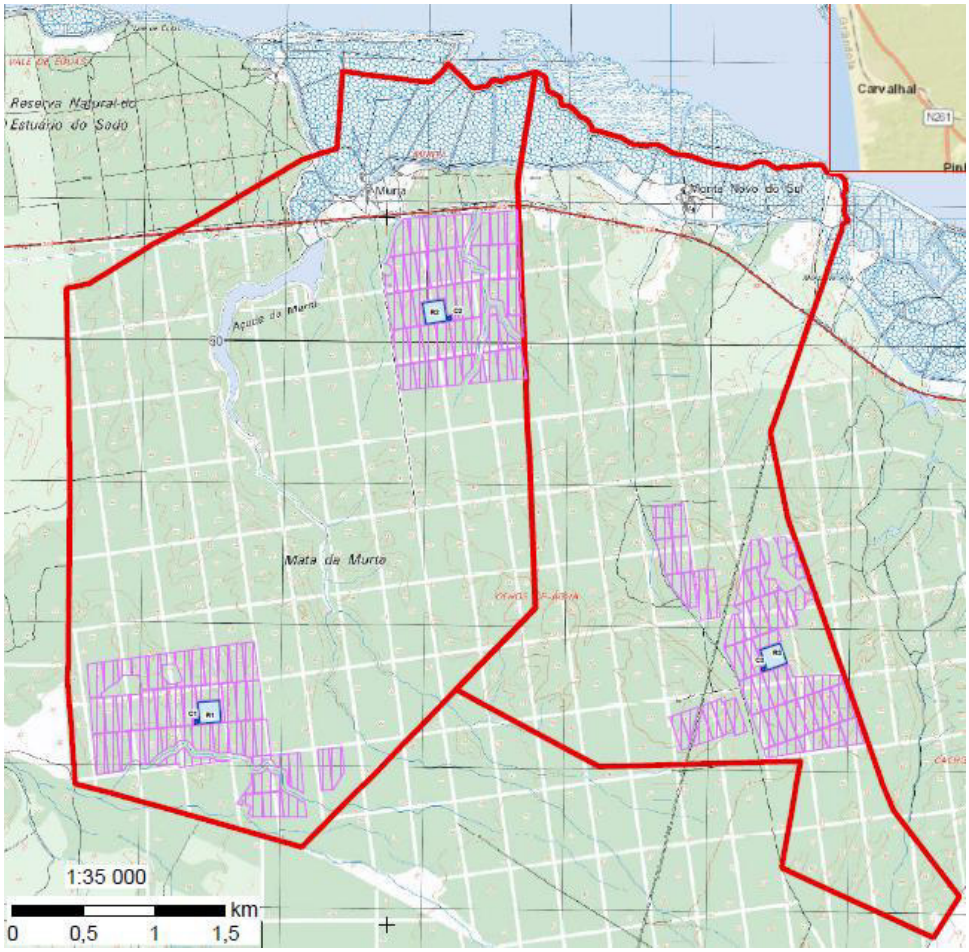
AQUATERRA

Expoente Frugal, Lda.

REFORMULAÇÃO DO PROJETO AGROFLORESTAL DAS HERDADES DA MURTA E MONTE NOVO (HM-MN-R)



Projeto de Execução

VOLUME 3/3 – ANEXOS TÉCNICOS

Maio de 2026

rios e aquíferos

REFORMULAÇÃO DO PROJETO AGROFLORESTAL DAS HERDADES DA MURTA E MONTE NOVO (HM-MN-R)

VOLUME 3/3 – ANEXOS TÉCNICOS

Nota de Apresentação

O presente documento constitui a **resposta ao nº 2 do artigo 16º do Decreto-Lei n.º 152-B/2017, de 11 de dezembro, na sua atual redação,** que altera o Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro, com alterações dadas pelos Decreto-Lei n.º 47/2014, de 24 de março e Decreto-Lei n.º 179/2015, de 27 de agosto, que estabelece o novo Regime Jurídico de Avaliação de Impacte Ambiental (RJAIA), relativo ao Estudo de Impacte Ambiental (EIA) do **Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo,** processo n.º 450.10.229.02.00017.2025 do Procedimento de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565, cuja reformulação foi aceite a 20 de novembro de 2025 na sequência do ofício da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo (CCDR Alentejo), de 13 de novembro de 2025, com referência S06762-2025-UACNB/DAA.

O presente documento é composto pelas seguintes peças:

- Volume 1/3 – Relatório Síntese;
- Volume 2/3 – Peças Desenhadas;
- **Volume 3/3 – Anexos Técnicos.**

Lisboa, maio de 2026

Rios&Aquíferos, Lda.

Assinado por: **Ricardina Guerreiro Fialho de Mira Coroa**
Num. de Identificação: 10301534
Data: 2026.05.21 18:31:17+01'00'
Certificado por: **SCAP**
Atributos certificados: **Gerente de RIOS & AQUÍFEROS, LDA**

Eng.ª Ricardina Fialho

(Sócia-gerente)

ÍNDICE DOS ANEXOS TÉCNICOS

Anexo 1.1 – Ofício nº S06762 - 2025 -UACNB/DAA

Anexo 1.2 – Parecer da Comissão de Avaliação ao Estudo de Impacte Ambiental

Anexo 1.3 – Aceitação da reformulação do projeto, nos termos previstos no artigo 16.º do RJAIA

Anexo 1.4 – Ações UOG – Plano de Gestão Florestal

Anexo 1.5 – Atas de Reuniões

Anexo 1.6 – Nota nº 063/2026 – Levantamento de Restrições de Licenciamento em Massas de Água

Anexo 1.7 – PIP092903.2026.RH6 emitido a 20/04/2026

Anexo 1.8 – Referência nº 652/ADM-GO/2026 - Inviabilidade de fornecimento de água para reutilização

Anexo 1.9 – Estudo de Viabilidade de uma Estação de Dessalinização para Produção de Água para Rega das Herdades da Aquaterra – Murta e Monte Novo

Anexo 1.10 – Memória Descritiva do Projeto de Rega

Anexo 1.11 – Inventário florístico da área de estudo

Anexo 1.12 – Impactes Cumulativo – Geocatalogo

Anexo 1.13 – Memória Descritiva e Justificativa dos Ventiladores

- Ficha Técnica dos Ventiladores

Anexo 1.14 – Preparação do Solo – Pré-plantação - Férbio

Anexo 1.15 – Avaliação Acústica – Relatório com referência n.º 26.3022.RAlE.Rlt1.Vrs1

Anexo 1.16 – Publicação Referências no desenvolvimento do estudo "Avaliação da Correlação entre o Deslocamentos Altimétricos Obtidos pelo InSAR e Dados Piezométricos do SNIRH"

Anexo 1.17 – Plano de Gestão Florestal

Anexo 1.1 – Ofício nº S06762 - 2025 -UACNB/DAA

CCDR ALENTEJO
Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, I.P.

REPÚBLICA PORTUGUESA
COESÃO TERRITORIAL

Exmo. Senhor Gerente
Expoente Frugal, Lda.
Rua Castilho, 213 - 5º
1070-050 LISBOA

Na sua resposta indique sempre a nossa referência

Sua Referência	Sua comunicação de	Nossa referência	Processo
		S06762-2025-UACNB/DAA	450.10.229.02.00017.2025

ASSUNTO: **Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP**
Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

No âmbito do processo de AIA relativo ao projeto em epígrafe, a Comissão de Avaliação (CA) concluiu que o projeto apresentado induzia impactes negativos significativos a muito significativos, os quais só são passiveis de minimização através, nomeadamente, da alteração do projeto, emitindo, assim, um parecer desfavorável ao mesmo.

Face ao Parecer da CA, e segundo o procedimento previsto no disposto no n.º 2 do artigo 16.º do Decreto-Lei nº 151-B, de 31 de outubro, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 11/2023, de 10 de fevereiro, solicita-se a V. Exa. que informe esta CCDR, IP, enquanto Autoridade de AIA, se aceita proceder à reformulação do projeto, no sentido de evitar ou reduzir os efeitos significativos no ambiente identificados no referido parecer, bem como avaliar a necessidade de prever medidas adicionais de minimização ou de compensação ambiental, no prazo de **5 dias úteis**.

Mais se informa que, em caso de aceitação, o procedimento de AIA em apreço ficará suspenso por um prazo não superior a seis meses, a contar daquela data, ao abrigo do disposto no n.º 3 do artigo 16.º do Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro, na sua atual redação.

O Parecer da CA e o Relatório da Consulta Pública encontram-se em:

http://www.ccdr-a.gov.pt/transferencias/AFMurtaMonteNovo.zip

Com os melhores cumprimentos,

Assinado digitalmente
Vice-Presidente
José Domingos Velez
13-11-2025 15:34

ML

Sede:

Av. Eng. Arantes e Oliveira, 193
7004-514 ÉVORA

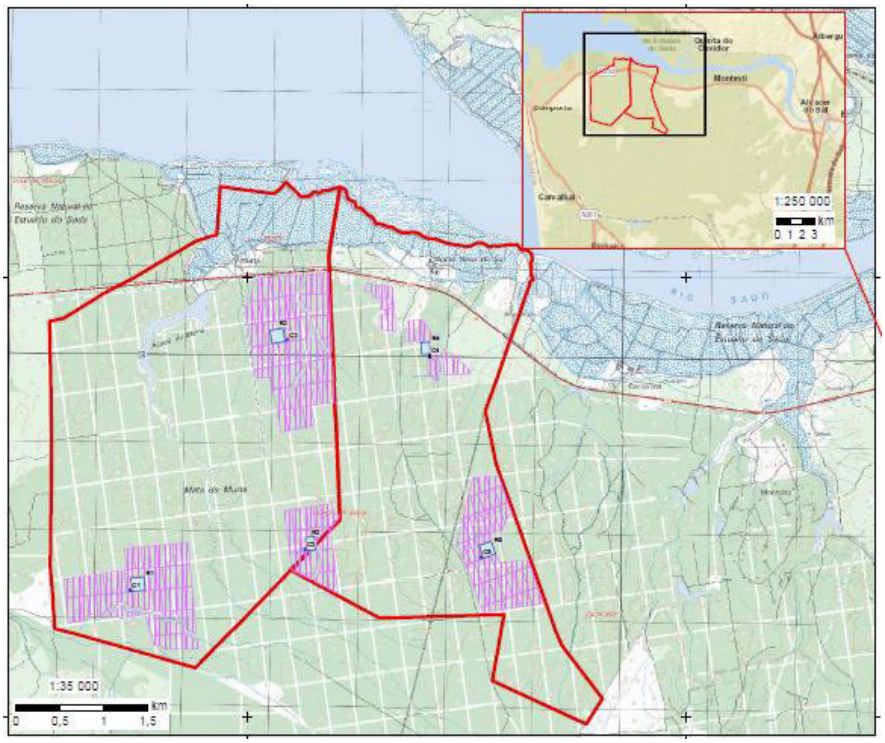
Telef: +351 266 740 300
Fax: +351 266 706 562
E-mail: geral@ccdr-a.gov.pt
www.ccdr-a.gov.pt

Anexo 1.2 – Parecer da Comissão de Avaliação ao Estudo de Impacte Ambiental

PARECER DA COMISSÃO DE AVALIAÇÃO

ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL

PROJETO AGROFLORESTAL DAS HERDADES DE MURTA E MONTE NOVO



Comissão de Avaliação

Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, IP

APA/Administração da Região Hidrográfica do Alentejo, IP

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, IP

Instituto do Património, IP

Unidade Local de Saúde do Litoral Alentejano

Agência para o Clima, IP

Câmara Municipal de Alcácer do Sal

NOVEMBRO 2025

ÍNDICE

1. IDENTIFICAÇÃO..... 3

2. APRECIAÇÃO..... 4

3. CONSULTA PÚBLICA..... 42

4. CONCLUSÕES..... 44

5. PARECER..... 46

6. ASSINATURAS..... 48

1. IDENTIFICAÇÃO	
EIA do Projeto	Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Fase do Projeto	Projeto de Execução
Localização	Concelho de Alcácer do Sal, freguesias de Comporta e União das freguesias de Alcácer do Sal (Santa Maria do Castelo e Santiago) e Santa Susana Em Rede Natura 2000: Zona Especial de Conservação Comporta Galé (PTCON0034); Zona de Proteção Especial do Açude da Murta (PTZPE0012)
Proponente	Expoente Frugal, Lda
Licenciador	Sem entidade licenciadora
Inicio da AIA	14 março 2025
Elaboração do EIA	RioseAquiferos, Lda
Autoridade de AIA	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, IP

Comissão de Avaliação (CA)	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, IP - Mário Lourido, Claudia Gonçalves, Ana Pedrosa e Paulo Ribeiro APA/Administração da Região Hidrográfica do Alentejo, IP - Ana Gonçalves Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, IP - Sandro Nóbrega Instituto do Património, IP - João Marques Unidade Local de Saúde do Litoral Alentejano - Joaquim Lopez Agência para o Clima, IP - André Alves Câmara Municipal de Alcácer do Sal - Joana Grilo (Plano Diretor Municipal)

Enquadramento Legal	Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro, na atual redação: - Artigo 1.º n.º 3 alínea b) ponto i) - projeto abrangido no limiar fixado no anexo II - Anexo II n.º 1 alínea d) área sensível - Desflorestação destinada à conversão para outro tipo de utilização das terras ≥ 10 ha

Projeto	O projeto propõe alterar o atual uso do solo florestal, com abate de 61.756 de pinheiro-manso e 4.770 de pinheiro-bravo, para criar um uso agrícola intensivo de regadio com tangerinas em 433,30 ha. A componente agrícola do projeto (360,63 ha de plantação e 72,67 ha de infraestruturas de apoio) prevê: - Um consumo de água subterrânea estimado em 2,28 hm³/ano, a captar em 16 furos profundos (178 a 288 m), com bombas submersíveis de 60 cv, e caudais extraídos entre os 21 a 53 L/s. A água captada é encaminhada por condutas enterradas, com 15.434 m de extensão para 5 reservatórios de armazenamento e com 37.275 m pela rede de rega; - A contratação de 50 trabalhadores na fase de construção (1 ano) e de 50 permanentes e 150 temporários na fase de exploração (25 a 30 anos), ficando os trabalhadores agrícolas alojados em habitações em Alcácer do Sal; - A produção estimada em 100 ton/dia a transportar em 5 camiões/dia na EN 253, até ao Centro de Embalagem e Distribuição em Alcácer do Sal.

2. APRECIAÇÃO

2.1 METODOLOGIA

Os documentos analisados foram: o EIA, de março de 2025; o Aditamento do EIA, de junho de 2025; as Alegações ao Parecer de Desconformidade do EIA, de julho de 2025; o Relatório da Consulta Pública, de setembro de 2025; e os Pareceres Externos.

Os trabalhos relativos à elaboração do EIA decorreram entre setembro de 2024 e março de 2025, embora contenham informação de trabalhos realizados na área de projeto desde 2016.

As entidades da CA emitiram os seguintes pareceres: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo IP, aos fatores Solos, Qualidade do Ar, Ruído, Sócioeconomia e Ordenamento do Território e Economia Circular; APA/Administração da Região Hidrográfica do Alentejo IP, ao fator Recursos Hídricos, bem como ao indicado no Relatório da Consulta Pública e nos Pareceres Externos; Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas IP, ao fator Sistemas Ecológicos, bem como ao indicado no Relatório da Consulta Pública e nos Pareceres Externos; Património Cultural IP, ao fator Património; Agência para o Clima IP, ao fator Alterações Climáticas; Câmara Municipal de Alcácer do Sal, sobre o enquadramento do Projeto no Plano Diretor Municipal.

A Unidade Local de Saúde do Litoral Alentejano não emitiu parecer ao fator Saúde Humana.

A CA realizou as reuniões, na fase de conformidade, em 31/03/2025, de Apresentação do Projeto/EIA, com o Proponente/Consultores, e na fase de avaliação em 10/11/2025, de Aprovação do Parecer Final.

A CA realizou visitas à área do Projeto, com o Proponente/Consultores, na fase de conformidade em 21/04/2025, e na fase de avaliação em 27/10/2025.

2.2 ANTECEDENTES

Na AIA n.º 529/2024 CCDRA IP, ao Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, a CA:

- Em janeiro, emitiu Parecer Desfavorável ao Projeto (805,35 ha para produção de pera-abacate);

- Em agosto, emitiu Parecer Desfavorável à Reformulação do Projeto (734,48 ha para produção de pera-abacate);

Na atual AIA n.º 565/2025 CCDRA IP, ao Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, a CA:

- Em junho, emitiu Parecer de Desconformidade ao EIA (433,30 ha para produção de tangerinas);

- Em julho, em sede de audiência de interessados, apreciada a pronúncia do proponente, foi declarada a conformidade do EIA, apesar de consideradas não totalmente esclarecidas questões relacionadas com os fatores Ruído, Sistemas Ecológicos e Alterações Climáticas.

2.3 ANÁLISE DOS FATORES AMBIENTAIS

SISTEMAS ECOLÓGICOS

Localização e descrição do projeto

O Projeto localiza-se no concelho de Alcácer do Sal, numa área total d 2402,1 ha, totalmente inserida em área de Rede Natura 2000: Zona Especial de Conservação (ZEC) Comporta-Galé (PTCON0034); Zona de Proteção Especial (ZPE) do Estuário do Sado (PTCON0011 e PTZPE0011); ZPE do Açude da Murta (PTZPE0012); Reserva Natural do Estuário do Sado. No entanto, as áreas de intervenção do projeto apenas se inserem na ZEC Comporta-Galé (componentes agrícola e florestal) e na ZPE do Açude da Murta (componente florestal).

O objetivo deste projeto é a instalação de uma área de produção de tangerinas (*Citrus reticulata* - variedade Nadorcott) para o mercado interno e indústria transformadora constituindo, segundo o EIA, um investimento relevante para o promotor e para a região do Alentejo Litoral.

Para a implantação do projeto prevê-se a execução das seguintes ações/infraestruturas: 16 furos de captação de água subterrânea para rega; Preparação do solo em 433,3 ha (desmatação, gradagem, limpeza de material lenhoso, lavoura e correção do solo); Construção de 5 reservatórios de armazenamento de água impermeabilizados; Construção de 5 casas de rega/bombagem; Construção, reconversão e beneficiação de caminhos internos e externos; Instalação de Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) sobre o plano de água e na cobertura das casas de rega (3,77 ha); Aquisição de máquinas e equipamentos agrícolas.

Dos 433,3 ha da área de intervenção, 360,63 ha correspondem à área de plantação (172 sectores, 556 plantas/ha) e 72,67 ha a área com estruturas e infraestruturas de apoio ao projeto. Está, ainda, previsto destinar 366,12 ha de florestas e matos para conservação e restauro em mosaico (sobreposição com área florestal de produção).

A rede elétrica do projeto desenvolve-se a partir dos postos de transformação existentes e, contempla uma rede de média tensão subterrânea e uma rede de baixa tensão, também subterrânea, para alimentar os equipamentos previstos (bombas submersíveis dos furos, bombas dos reservatórios de armazenamento de água, bombas da fertirrega, bombas de filtração, tomadas e iluminação). Também serão instaladas torres antigeada que, segundo a ficha técnica, terão uma altura máxima de 13,45 m.

Prevê-se que a plantação tenha um horizonte de 25 a 30 anos, podendo a plantação ser renovada. Neste projeto está ainda prevista a reflorestação de 80 ha com pinheiro-manso e pinheiro-bravo.

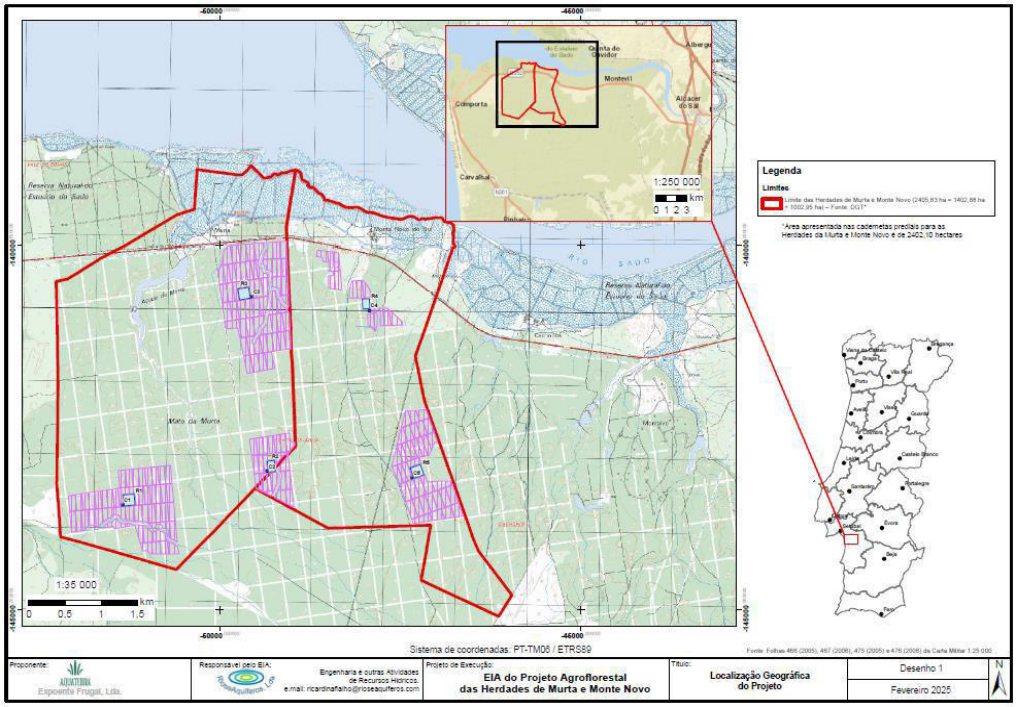


Figura 1 - Localização do projeto

Componente conservação da natureza

Situação de referência

A área de estudo (2402,1 ha), está totalmente inserida em áreas de Rede Natura 2000 sendo que a área de intervenção do projeto (433,3 ha) está na ZEC Comporta-Galé, classificada para proteção/conservação de habitats associados aos sistemas dunares e às zonas húmidas. Esta ZEC ainda alberga importantes valores florísticos.

Na área de estudo, onde se pretende implantar esta cultura agrícola, o pinheiro manso é a espécie que predomina, estando também presentes, pontualmente, alguns pinheiros-bravos e sobreiros. Relativamente à vegetação arbustiva, observa-se que algumas áreas da propriedade foram lavradas e estão totalmente desprovidas de vegetação, existindo ainda assim várias manchas com presença de tojo, mato-branco, urze, tomilho, tojo-chamusco, cistáceas entre outras espécies arbustivas e herbáceas.

Flora

Quanto à flora, foram elencadas 147 espécies sendo as famílias mais comuns a *Asteraceae*, *Poaceae* e *Fabaceae*. Destas, foram identificadas, em campo, 12 espécies RELAPE (*Santolina impressa, Dianthus broteri, Herniaria maritima, Juniperus navicularis, Cytisus grandiflorus, Stauracanthus genistoides, Ulex australis subsp. welwitschianus, Quercus suber, Thymus capitellatus, Armeria rouyana* [1] *Scrophularia sublyrata* e *Verbascum litigiosum)* sendo que aquelas que apresentam maiores densidades (50 indíviduos/ha ou superior) são a *Thymus capitellatus, Armeria rouyana* e *Santolina impressa*. Algumas destas espécies têm estatuto de ameaça de "Quase Ameaçado" [2] e/ou são raras [3], designadamente *Santolina impressa, Herniaria maritima, Juniperus navicularis, Armeria rouyana*[4]*, Scrophularia sublyrata* e *Verbascum litigiosum*.

Nos trabalhos de campo foi também identificada a presença de espécies exóticas invasoras, do Decreto-Lei n.º 92/2019, de 10 de julho, nomeadamente acácias na área de montado (nordeste da Herdade do Monte Novo).

[1] Espécie de conservação prioritária de acordo com o Decreto-lei n.º140/99, de 24 de abril, na sua redação atual

[2] Carapeto A., Francisco A., Pereira P., Porto M. (eds.). (2020). Lista Vermelha da Flora Vascular de Portugal Continental. Sociedade Portuguesa de Botânica, Associação Portuguesa de Ciência da Vegetação – PHYTOS e Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (coord.). Coleção «Botânica em Português», Volume 7. Lisboa: Imprensa Nacional, 374 pp

[3] Flora-On: Flora de Portugal Interactiva. (2025). Sociedade Portuguesa de Botânica. www.flora-on.pt.

[4] Espécie de conservação prioritária de acordo com o Decreto-lei n.º140/99, de 24 de abril, na sua redação atual

Vegetação e Habitats

Nos trabalhos do EIA foram identificadas 17 unidades de vegetação sendo dominante a unidade de matos (50,56%), seguida de pinhal-manso (25,24%) e, em menor área, de arrozal (6,88%), matos rasos (5,54%), áreas artificializadas (2,81%), zimbral (2,71%) e montado misto (2,16%). As restantes unidades ocupam áreas inferiores a 2%.

Para o pinhal-manso é referido, no EIA, que, dependendo da gestão efetuada, o subcoberto varia quanto à presença de matos mais ou menos densos e mais ou menos altos. Os matos no subcoberto do montado apresentam maiores densidades, o zimbral aparece fragmentado em manchas dispersas de pouca densidade e o arrozal ocorre na zona norte da área de estudo, próximo do Rio Sado.

Segundo o EIA, para a caracterização dos habitats presentes na área de estudo utilizaram-se os critérios constantes das Fichas de caracterização ecológica dos habitats do Plano Setorial da Rede Natura 2000. Assim, identifica-se, no EIA, a presença de 9 habitats listados no Anexo B-I do Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na sua redação atual, designadamente:

- 1140 - Lodaçais e areais a descoberto na maré baixa;
- 1420 - Matos halófilos mediterrânicos e termoatlânticos (*Sarcocornetea fruticosi*);
- 1430 - Matos halonitrófilos (*Pegano-Salsoletea*);
- 2150* - Dunas fixas descalcificadas atlânticas (*Calluno-Ulicetea*) (habitat prioritário). O bioindicador deste habitat é a espécie *Ulex australis* subsp. *welwitschianus*, estando este presente no sob coberto de áreas de pinhal manso, matos e no montado;
- 2250* - Dunas litorais com *Juniperus spp*. (habitat prioritário). O bioindicador deste habitat é a espécie *Juniperus navicularis*, estando representado essencialmente nas áreas de zimbral;
- 2260 - Dunas com vegetação esclerófita (*Cisto-Lavanduletalia*). O bioindicador deste habitat é a espécie *Stauracanthus genistoides* e este é o habitat mais comum na área de estudo, apresentando diferentes níveis de conservação;
- 2330 - Dunas interiores com prados abertos de *Corynephorus* e *Agrostis*;
- 6310 - Montados de *Quercus spp.* de folha perene. Este habitat corresponde às áreas de montado, sendo a espécie bioindicadora o sobreiro. É não-pastoreado e não apresenta sistema de cultura arvense extensiva;
- 6410 - Pradarias com Molinia em solos calcários, turfosos e argilo-limosos (*Molinion caeruleae*). Este habitat corresponde às áreas de juncal, sendo as espécies bioindicadoras *Juncus conglomeratus* e *Juncus effusus*.

Estes habitats ocupam 88% da área de estudo, em mosaico ou isolados, sendo o Habitat 2260 o mais comum (66,88% ou 1609,10 ha), seguido do Habitat 2150* (5,76%) e dos complexos 2260+2150* (3,71%) e 2260+2330 (3,14%).

No EIA, é apresentado o estado de conservação dos vários Habitats identificados sendo que 22,49 ha se encontram em bom estado, 1654,167 ha em estado evolutivo e 978,945 ha em estado degradado. Embora esteja identificado na cartografia apresentada a área de ocupação de cada estado de conservação, é de referir que a soma destas áreas, no Quadro 5.46 do EIA, é superior à área de estudo. No entanto, é evidente que a maioria da área de estudo tem habitats no estado evolutivo, ou seja, há condições naturais para o habitat existir e evoluir.

Fauna

Relativamente à fauna, elencaram-se as espécies potencialmente presentes na área de estudo, sobretudo com recurso a bibliografia, nomeadamente espécies da ictiofauna, herpetofauna, avifauna e mamofauna (voadora e não voadora). No campo (metodologia não dirigida) foi identificada a presença de 32 espécies de aves e duas espécies de mamíferos incluindo a lebre (*Lepus granatensis*), espécie com estatuto de ameaça de Vulnerável[5].

Do elenco faunístico apresentado no RS do EIA destaca-se a potencial presença, na área de estudo, de espécies com estatuto de ameaça elevado, nomeadamente o rato-de-cabrera (*Microtus cabrerae*) e espécies de aves aquáticas (e.g. *Ardea purpurea, Ixobrychus minutus, Podiceps nigricollis*).

Assim, da caracterização de referência, destaca-se a presença de habitats listados no Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na sua redação atual, em grande parte da área de estudo, e de espécies da flora RELAPE, também distribuídas na área de estudo, e a potencial presença de fauna diversificada associada ao meio terrestre e aquático.

Refere-se, no RS do EIA, as pressões negativas dos incêndios e as espécies exóticas de carácter invasor sobre os habitats presentes na área de estudo.

[5] Mathias ML (coord.), Fonseca C, Rodrigues L, Grilo C, Lopes-Fernandes M, Palmeirim JM, Santos-Reis M, Alves PC, Cabral JA, Ferreira M, Mira A, Eira C, Negrões N, Paupério J, Pita R, Rainho A, Rosalino LM, Tapisso JT, Vingada J (eds.) (2023). Livro Vermelho dos Mamíferos de Portugal Continental. FCiências.ID, ICNF, Lisboa

Avaliação dos impactes

No EIA, a avaliação de impactes é efetuada separadamente para as várias fases do projeto, fase de construção, exploração e desativação, sendo atribuído a cada tipologia de impacte uma pontuação de acordo com o valor ecológico do recetor de impacte, duração, reversibilidade, probabilidade, âmbito de influência e magnitude. Os valores mais altos correspondem a impactes negativos com maiores significâncias.

Fase de construção

Nesta fase é esperada a afetação de vegetação na área de intervenção (433,30 ha) com quebra do contínuo natural e fragmentação de habitats. Esta afetação decorrerá da mobilização do solo por maquinaria para a plantação do pomar e da circulação desta, referindo o EIA a emissão de poeiras que afetam a atividade fotossintética, e da implantação das infraestruturas de apoio.

Face à caracterização da situação de referência a construção do projeto implica a afetação de habitats naturais, principalmente de 2260 e 2330 e de pequenas manchas dos habitats prioritários de 2150* e 2250* (Figura 2).

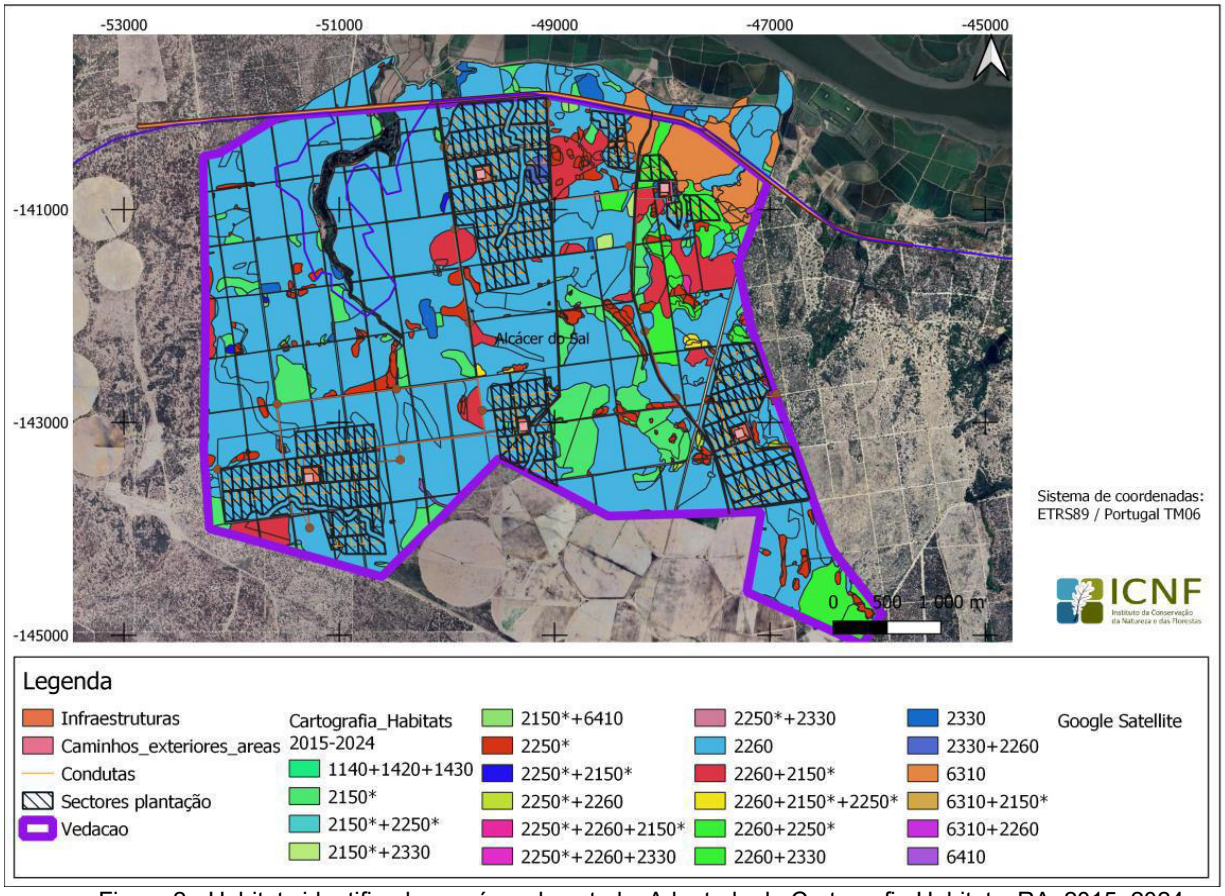


Figura 2 - Habitats identificados na área de estudo. Adaptado da Cartografia Habitats_RA_2015a2024.

Refere-se, no EIA, que foi realizada a otimização do projeto de modo a garantir a integridade dos habitats prioritários da Rede Natura 2000 existentes na área de estudo, através de um zonamento funcional que permitiu definir extensas áreas de continuidade para os valores naturais (corredores ecológicos) que foram cartografados, garantindo-se, em simultâneo, a salvaguarda das zonas húmidas existentes na propriedade, das manchas florestais mistas de pinheiro-manso e de sobreiros, e a preservação e conservação dos habitats prioritários.

É mencionado, no EIA, que o projeto afeta sobretudo habitats 2260 e 2330 que não são prioritários, por terem uma elevada representatividade na ZEC Comporta-Galé, tratando-se de um habitat resiliente.

Sobre o Habitat 2260 é importante referir que, apesar desta representatividade, a área de distribuição deste tem uma tendência negativa[6]. Este impacte é considerado, no EIA, como negativo, certo, direto, permanente, local, reversível, de magnitude elevada, face à área a intervencionar e à tipologia dos habitats afetados sendo que a afetação dos habitats tem um impacte de elevada significância.

É de referir que este projeto incide sobre áreas com diferentes graus de conservação, designadamente áreas com estado degradado e evolutivo (Figura 3).

[6]Biodiversity Information System for Europe - Habitat 2260. Informação disponível em: https://biodiversity.europa.eu/habitats/ANNEX1_2260

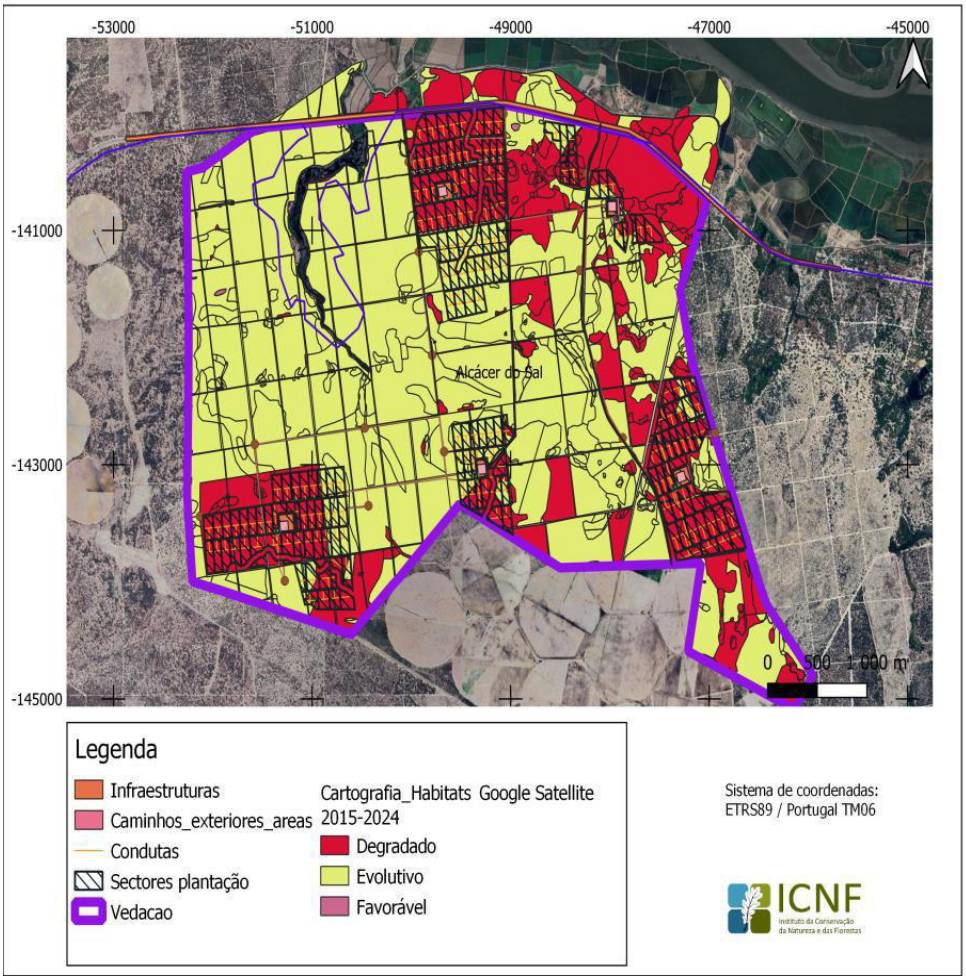


Figura 3 - Estado de conservação dos Habitats identificados na área de estudo. Adaptado da Cartografia Habitats_RA_2015a2024.

Quanto à área de instalação dos apoios à obra refere-se, no EIA, que esta ocorrerá em áreas de baixo valor ecológico, considerando-se este impacte de magnitude reduzida, temporário e de baixa significância.

Relativamente à flora RELAPE presente na área de estudo é referida, no EIA, a afetação pela implementação dos sectores de áreas com maiores densidades de *Santolina impressa*, *Thymus capitellatus, Armeria rouyana, Cytisus grandiflorus e Verbascum litigiosum* (densidade superior a 40 ind/ha). Este impacte é considerado, no EIA, negativo, permanente, direto, certo, local e reversível, de magnitude moderada, mas de elevada significância. Embora em menores densidades, referindo que estas espécies têm uma maior presença nos sectores de plantação.

Refere-se que não há necessidade de abate de quercíneas (sobreiro e azinheira) para a execução do projeto.

Destaca-se, no EIA, ainda, a afetação da vegetação, habitats e flora indireta resultante da circulação de máquinas e veículos e da construção que poderá levar à degradação desta vegetação na envolvente do projeto. Este impacte é classificado como negativo, temporário, reversível, indireto, local, provável, no caso da suspensão de poeiras e deterioração da qualidade do ar, improvável, no caso da deterioração da qualidade do solo e água ou ocorrência de incêndio, de magnitude elevada e significância moderada.

Relativamente às espécies exóticas invasoras é referido, no EIA, que as atividades associadas à construção como a circulação de veículos e a movimentação de terras poderá favorecer a sua dispersão. Este impacte é considerado negativo, temporário, indireto, provável, local, reversível, de magnitude elevada e significância moderada.

Quanto à fauna é referido, no EIA, ser expectável a perda de habitat e exclusão de espécies, pelo menos temporária. A degradação/perda de habitats é considerada um impacte negativo, temporário (na degradação), permanente (na perda), local, certo, indireto a direto, reversível, de magnitude moderada e de significância baixa a moderada.

A exclusão da fauna poderá ser resultante da perturbação causada pelas atividades de construção sendo mais impactante se algumas destas ocorrerem no período de reprodução. Dada a presença da ZPE do Açude da Murta na área de estudo, este impacte é considerado, no EIA, como negativo, temporário, local, certo, direto, reversível e de elevada significância.

O risco de mortalidade associado à circulação de veículos e maquinaria é considerado, no EIA, um impacte negativo, temporário, local, provável, direto, irreversível, de magnitude moderada e de moderada significância.

Fase de exploração

Nesta fase é esperada a diminuição dos níveis de perturbação sendo expectável o aumento da utilização humana e movimentação de veículos, associada à atividade agrícola, bem como o funcionamento do sistema de rega.

A maior disponibilidade de água poderá ter consequências ao nível da comunidade florística levando à sua alteração ao longo do tempo para uma flora mais cosmopolita, ou mesmo exótica, característica de sistemas agrícolas intensivos em detrimento das espécies especializadas e adaptadas às presentes condições locais (espécies bioindicadoras dos habitats listados no Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na sua redação atual, e espécies RELAPE). Este impacte é considerado, no EIA, como negativo, direto, permanente, certo, local, reversível, de magnitude média e significância moderada.

As movimentações de veículos poderão levar à emissão de poeiras, contribuindo para a degradação da comunidade florística local, bem como ao aumento do risco de mortalidade e à perturbação da fauna. Estes impactes são considerados, no EIA, permanentes e de magnitude moderada.

Na fase de exploração serão ainda instalados, na área agrícola, 20 ventiladores antigeada, sendo referido, no EIA, haver incerteza quanto ao seu impacte na avifauna e mamofauna voadora, designadamente o risco de colisão com as pás em funcionamento (funcionamento noturno). Prevê-se que estes sejam instalados apenas entre dezembro e março, após um período experimental de 2 anos de permanência a tempo inteiro.

Fase de desativação

É referido, no EIA, que os impactes nesta fase deverão ser semelhantes aos da fase de construção. Contundo, menos significativos e a decorrer num menor período de tempo.

Relativamente à evolução da situação do ambiente, no fator em análise, sem o projeto, refere-se, no EIA, ser previsível a continuação da exploração das áreas de pinhal *«sendo que, caso as ações de gestão florestal sejam adequadas e compatíveis com os valores naturais em presença, se prevê a manutenção, recuperação e evolução das formações vegetais de maior valor ecológico».* E acrescenta-se ser expectável o aumento da presença da Acácia na área de estudo caso não haja controlo da espécie. Assim, é esperado que a execução deste projeto tenha impactes negativos, sobretudo ao nível da afetação da vegetação, flora e habitats na fase de construção.

O projeto está inserido na ZEC Comporta-Galé, importante para a proteção de habitats naturais associados às areias e dunas, e que, por definição, é *«um sítio de importância comunitária no território nacional em que são aplicadas as medidas necessárias para a manutenção ou o restabelecimento do estado de conservação favorável dos habitats naturais ou das populações das espécies para as quais o sítio é designado*[7]*»* sendo um dos seus objetivos *«(...) assegurar a biodiversidade, através da conservação ou do restabelecimento dos habitats naturais e da flora e da fauna selvagens num estado de conservação favorável, da protecção, gestão e controlo das espécies (...)»*[8].

Impactes cumulativos

Refere-se, no EIA, que o âmbito geográfico desta análise é a área total da ZEC Comporta-Galé tendo sido obtida informação relativa a projetos avaliados no âmbito do AIA e fora deste e de várias tipologias.

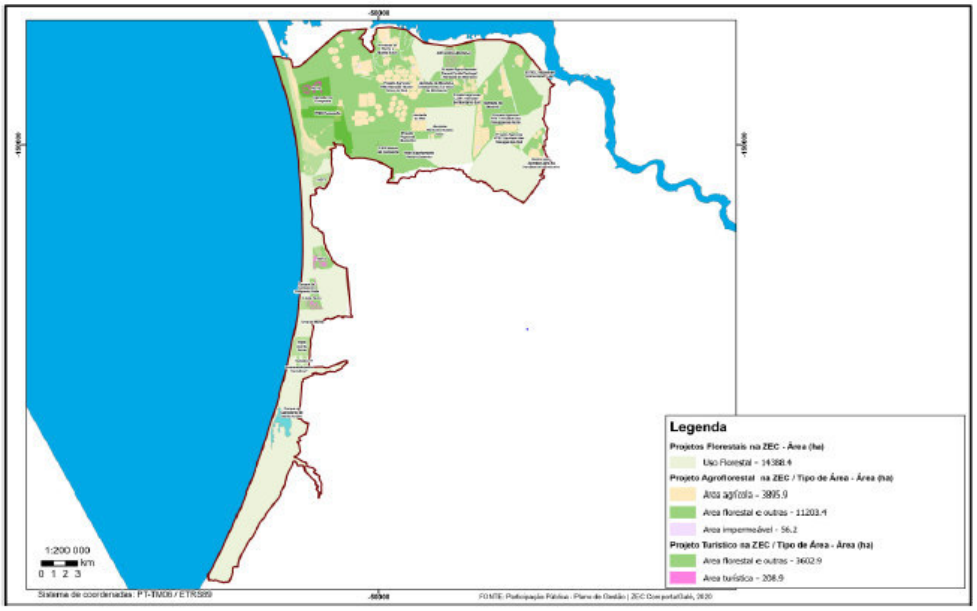


Figura 4 - Prédios estudados para avaliação dos Impactes Cumulativos na ZEC Comporta-Galé. Fonte: RS do EIA.

[7] Alínea n) do n.º 1 do artigo 3.º do Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na sua redação atual

[8] N.º 2 do artigo 1.º do Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na sua redação atual

Considerando a totalidade dos projetos identificados para esta análise foi apresentada, no EIA, a percentagem dos habitats afetados por todos estes. Relativamente ao Habitat 2260, aquele com maior afetação por este projeto, refere-se que houve uma afetação total de 0,63% (área agrícola, turística e impermeável) anterior tendo passado de uma representação de 11,66% para 10,91% da ZEC.

Relativamente aos impactes cumulativos sobre a flora alvo da ZEC Comporta-Galé verifica-se, no Quadro 6.29 do EIA, existir uma afetação negativa generalizada da área de distribuição destas espécies. Assim, a concretização do projeto em conjunto com outros projetos, contribuirá para a redução da área representada por habitats de interesse na ZEC Comporta-Galé, e para a diminuição da área de distribuição de espécies alvo desta.

Riscos

No EIA são analisados os riscos ambientais associados à execução do projeto, sendo associados, maioritariamente, à circulação de máquinas agrícolas e equipamentos, nomeadamente o manuseamento deficiente destas, ruído e emissão de poeiras, e às causas externas como as alterações climáticas e incêndios florestais. São considerados de baixa a média probabilidade de ocorrência, propondo-se, no EIA, recomendações que visam reduzir estes riscos.

Medidas de minimização

As medidas de minimização apresentadas, segundo o EIA, visam *"acautelar, minimizar ou compensar os potenciais impactes negativos identificados"*. O EIA assina ainda que *"No caso das eventuais medidas de compensação estas são propostas apenas quando se considera que não é possível evitar ou reduzir um impacte negativo de forma significativa, nestes casos, propõe-se, a restituição do valor ou recurso ambiental que foi afetado pelo projeto e/ou a sua valorização, noutro local. Neste caso específico referem-se medidas de conservação e de valorização definidas para o descritor ecologia – flora e vegetação."*

São propostas também medidas potenciadoras de impactes positivos, ou seja, medidas que visam promover os efeitos positivos que a concretização do projeto irá originar. São apresentadas medidas de carácter geral, que reportam ao documento *"Medidas de Minimização Gerais da Fase de Construção"* elaborado pela APA, medidas de carácter geral e medidas de valorização e conservação.

No que respeita às medidas de carácter específico, as mesmas focam-se essencialmente nos habitats prioritários 2150* e 2250* e nas espécies *Armeria rouyana**, *Juniperus navicularis* e *Santolina impressa*, designadamente na proteção dos habitats prioritários e colheita de propágulos/sementes das várias espécies.

Sobre a proteção dos habitats prioritários, é proposta a realização de um novo levantamento de campo, prévio à fase de construção, na área de plantação para identificação destes e posterior interdição de plantação nestas áreas. Julga-se que esta medida potencia o isolamento destas áreas podendo quebrar a dinâmica natural com a envolvente que permite manter a sua funcionalidade e, consequentemente, a sua conservação a longo prazo e evolução para mosaicos mais complexos. Mais, esta delimitação das áreas identificadas impede a expansão destes habitats que não poderão desenvolver-se para além da área interdita, limitando o aumento da área de ocupação.

É proposta ainda a realização de sementeiras de espécies companheiras do habitat 2260 (*Thymus capitellatus, Halimium calycinum e Lavandula pedunculata*) nos taludes das charcas, bem como nas entrelinhas de plantação, para melhoria da estrutura do solo e aumento da matéria orgânica.

Relativamente a esta última medida, ressalva-se o referido anteriormente no N/ ofício de resposta aos elementos adicionais, *«embora possa contribuir para a salvaguarda das espécies per se, não contribui para a salvaguarda do habitat referido, uma vez que tais exemplares deverão ser considerados como cultivados, ao abrigo do n.º 3 do Artigo 12.º do Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na sua redação atual, referente a espécies artificialmente propagadas, uma vez que se considera que as entrelinhas são parte do projeto agrícola e não parte dos sistemas naturais ou seminaturais que interessa proteger».*

Para a fauna são propostas medidas para aumento das áreas de refúgio (amontoados de pedra e caixas-abrigo para morcegos e aves insectívoras) e de alimentação junto à ZPE do Açude da Murta e para minimização do risco de colisão das aves com os ventiladores anti geada.

Sobre as medidas de conservação e valorização, é proposta, no EIA, uma estratégia que promove o equilíbrio da exploração agrícola com a sustentabilidade dos valores naturais da ZEC - Comporta/Galé, que assenta em medidas de Conservação, Valorização e Recuperação paisagística, nomeadamente na conservação e valorização de uma área de mosaicos sobreposta com a área florestal de 366,12 ha para conservação dos habitats e espécies RELAPE identificados na área de estudo, na minimização e valorização na área total que será intervencionada nas Herdades da Murta e Monte Novo para preservação das espécies RELAPE.

Programa de Monitorização

É proposta, no EIA, a implementação de um Plano de Monitorização dos Valores Naturais - Flora e Vegetação. Este tem por objetivos a avaliação dos habitats de interesse comunitário e espécies de flora listadas nos anexos B-II ou B-IV do RJRN2000 e /ou na Lista Vermelha da Flora Vascular presentes na propriedade, e acompanhamento da eficácia das medidas várias medidas de conservação como as sementeiras e o controlo de espécies exóticas.

Prevê-se que a monitorização para a avaliação dos habitats e das espécies seja efetuada de 2 em 2 anos durante toda a vida útil do projeto, e a avaliação da eficácia seja efetuada anualmente num período mínimo de 5 anos.

Propõe-se ainda um Plano de Monitorização dos Valores Naturais - Fauna, com o objetivo de avaliação da eficácia das medidas dirigidas a este grupo, incluindo a identificação de aves mortas no local devido ao choque com as pás dos ventiladores que estarão em funcionamento. A periodicidade será diferente conforme o objetivo a atingir.

Caso particular do Açude da Murta

A propriedade integra na totalidade a Rede Natura 2000, nomeadamente ZEC Estuário do Sado, ZEC Comporta-Galé, ZPE Estuário do Sado e a ZPE Açude da Murta (Figura 5 e 6).

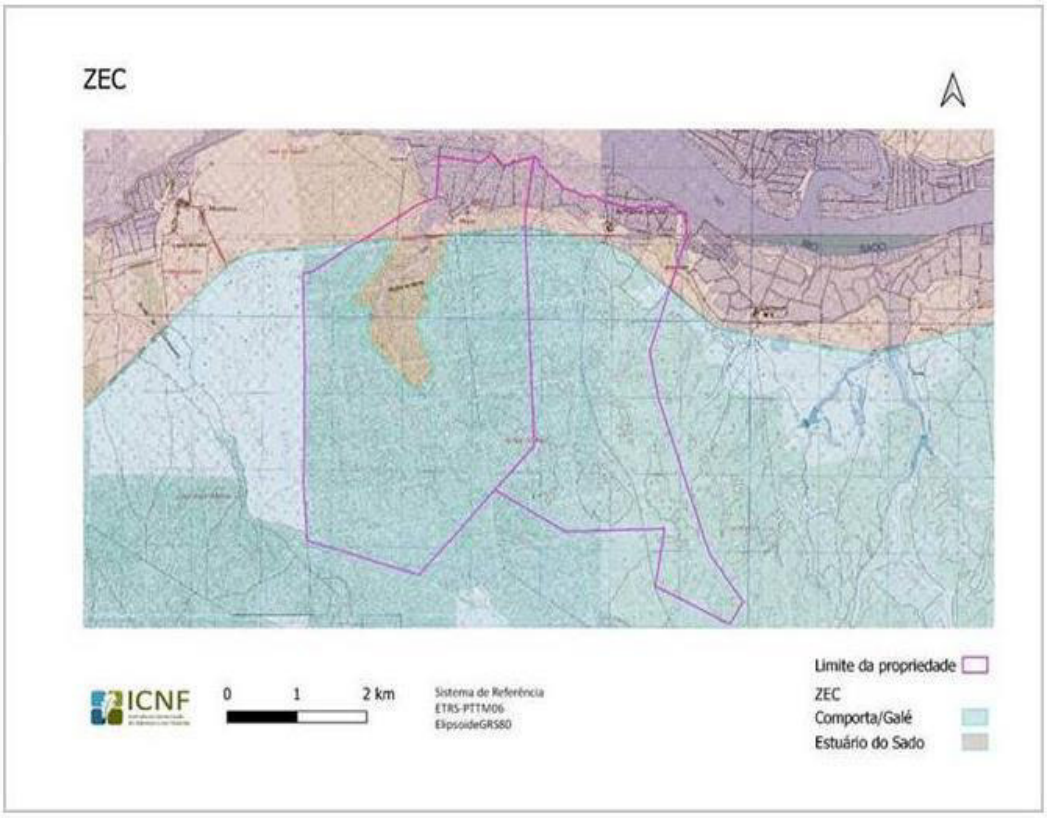


Figura 5 - Limite da propriedade e ZEC Estuário do Sado e ZEC Comporta-Galé

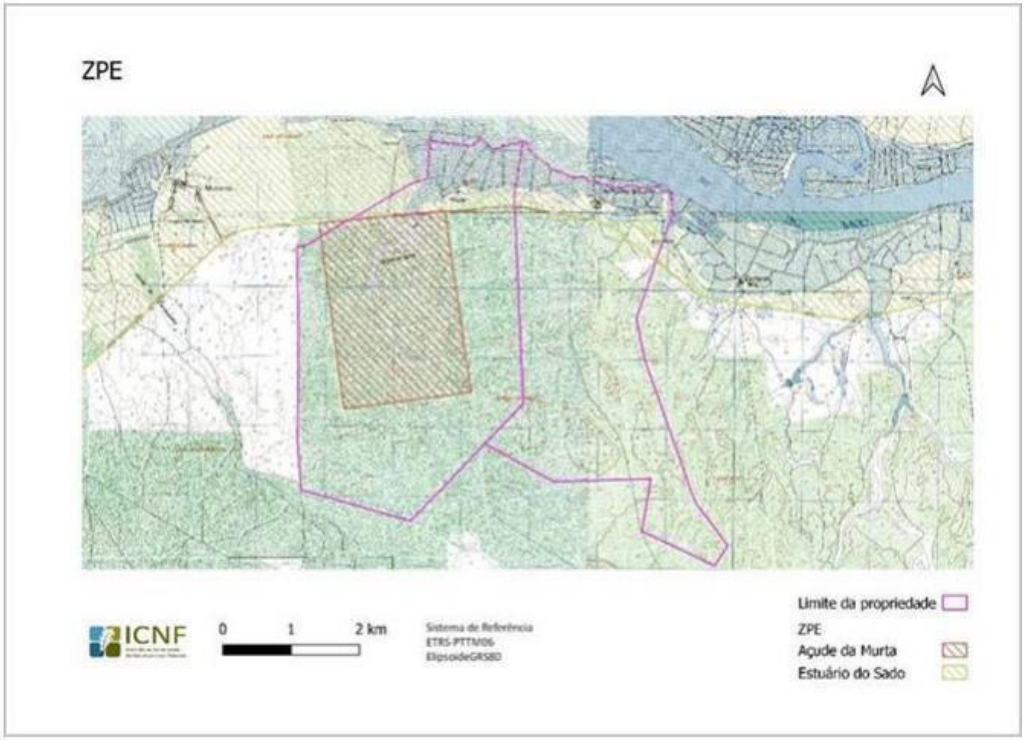


Figura 6 - Limite da propriedade e da ZEC e ZPE Estuário o Sado e regimes de proteção da RNES

Em relação às áreas classificadas, verifica-se que a propriedade a norte é coincidente com: Reserva Natural do Estuário do Sado (RNES) - Resolução de Conselho de Ministros n.º 182/2008, de 24 de novembro; Zona Especial de Conservação (ZEC) Estuário do Sado - PTCON0011 aprovado pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 142/97, de 28 de agosto, e Decreto Regulamentar n.º 1/2020, de 16 de março; Zona de Proteção Especial (ZPE) Estuário do Sado aprovada pelo Decreto-Lei n.º 384-B/99, de 23 de setembro. ZPE Açude da Murta (PTZPE0012) - Decreto-Lei n.º 384-B/99, de 23 de setembro de 1999. Não estão previstas áreas de plantação nem de infraestruturas para as áreas classificadas acima referidas.

De salientar que a disponibilidade de água é fundamental para a manutenção dos habitats espécies e a sobrevivência de espécies, identificados na ZPE Açude da Murta (PTZPE0012), nomeadamente para colónias de garças-brancas-pequenas (*Egretta garzetta*), e garças-boeiras (*Bubulcus ibis*) e para nidificação de garças-vermelhas (*Ardea purpurea*).

A sobre exploração do aquífero decorrente do número de captações poderá afetar de forma negativa e significativa, os habitats caraterísticos do Açude da Murta e consequentemente da fauna que dele dependem.

Componente Florestal

Apresentado o enquadramento ao projeto e após visita de campo à área em apreço, verificou-se que a situação atual de área florestal implementada se traduz num rendimento da exploração florestal muito baixo e os produtos existentes que geram algum rendimento são a pinha proveniente do pinheiro-manso e a madeira proveniente de pinheiro-manso e bravo, bem como alguma cortiça.

Quanto ao Decreto-Lei n.º 169/2001, de 25 de maio, na sua atual redação, embora no desenho 14.2, EIA volume 2, relativo à ocupação atual do solo (Figura 7) se verifique a presença de sobreiros, o ponto 5.9.4.4 EIA volume 1 - relativo a Recursos Florestais - Montado de sobro e azinho, esclarece que os mesmos serão salvaguardados, *"O abate destes exemplares, que não está previsto no âmbito do presente projeto, carece sempre de um pedido prévio de autorização de abate junto do ICNF".* Desta forma, não está contemplado o abate de sobreiros neste projeto.

O abate de espécies arbóreas solicitado no projeto será, portanto, relativo a pinheiro-manso (61.756 exemplares ou 191,85 ha) e pinheiro-bravo (4.770 exemplares ou 34,79 ha).

De forma compensatória, o projeto prevê a florestação/rearborização de 5,5 ha com espécies vegetais autóctones e 80 ha com pinheiros-mansos (16.733 exemplares) e Pinheiros Bravos (50.199 exemplares).

Relativamente ao Plano de Gestão Florestal (PGF), apresentado para as propriedades, o mesmo aguarda a decisão sobre a AIA e emissão de DIA, pois o PGF apresenta as áreas pretendidas para conversão agrícola já como "garantidas", não sendo possível avançar com a análise sem a decisão, fundamental, relativa ao projeto em apreço.

O PGF em questão, apresenta, no entanto para a restante área florestal, operações silvícolas de beneficiação dos povoamentos, projetadas num horizonte de 10 anos.

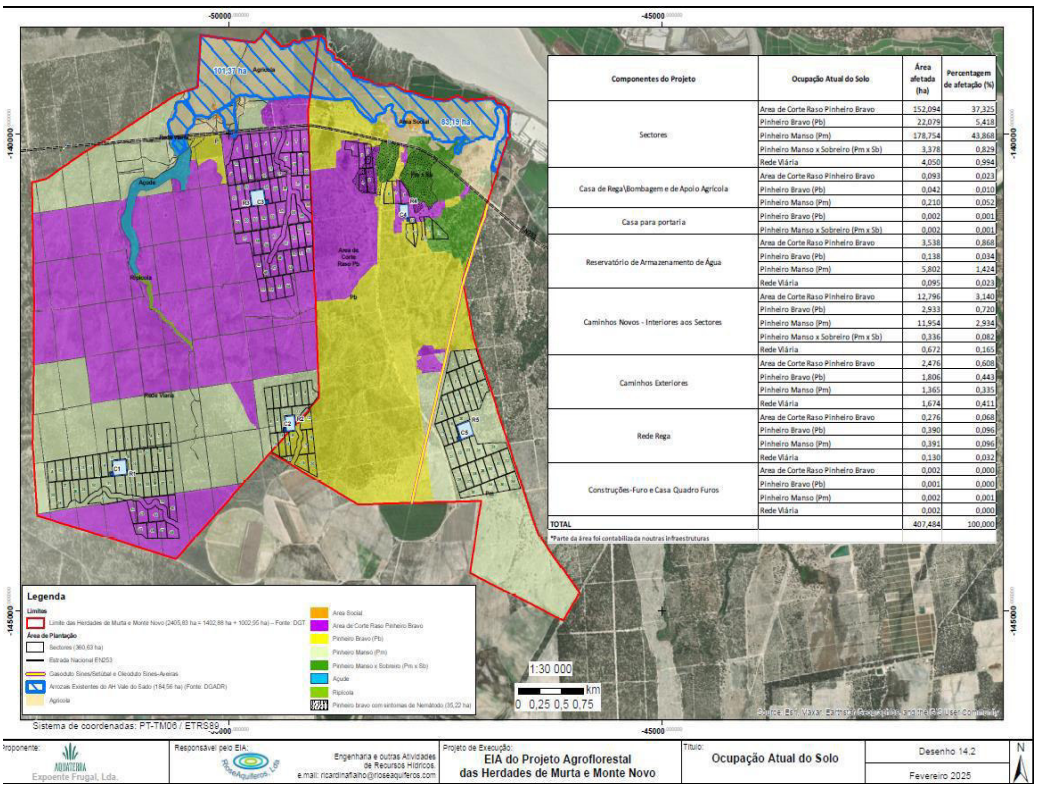


Figura 7 - Desenho 14.2 do EIA - Ocupação atual do solo

Considerações finais

O projeto está totalmente inserido em áreas da Rede Natura 2000. Assim, para a análise do mesmo, importa, antes de mais, relevar que estas constituem uma rede europeia de zonas especiais, dedicadas à conservação da natureza, criadas no âmbito das Diretivas Aves (Diretiva 79/409/CEE do Conselho, de 2 de abril de 1979, revogada pela Diretiva 2009/147/CE, de 30 de novembro) e Habitats (Diretiva 92/43/CEE do Conselho de 21 de maio de 1992), cuja finalidade é assegurar a conservação, a longo prazo, das espécies e dos habitats mais ameaçados da Europa.

Existe, por isso, a necessidade de manter num estado de conservação favorável os valores naturais que estão na origem da designação destas áreas, o que implica assegurar, entre outros fatores, a integridade biológica dos sítios da Rede Natura 2000 mantendo a sua coerência global. Ora, considerando o indicado no EIA, designadamente na caracterização da situação de referência, verifica-se existir a afetação de habitats de interesse, do Anexo B-I do Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na redação atual, na execução do projeto sendo impactes muito significativos.

O projeto trata da conversão de usos do solo, essencialmente florestais para agrícolas, cuja compatibilidade com a conservação dos valores naturais presentes ou potencialmente presentes na área de estudo não é garantida, pois a gestão da cultura agrícola (e.g. mobilização de solo, correção química de solo, corte regular da vegetação para passagem de máquinas e pessoas), bem como a presença de rega, levam a alterações das comunidades vegetais, entre outros aspetos, simplificando-as impedem o desenvolvimento/evolução natural das comunidades atualmente existentes que, no futuro, possam constituir habitats ou mosaico de habitats em bom estado de conservação.

Acresce referir a importância da disponibilidade de água é fundamental à manutenção dos habitats e sobrevivência de espécies pelo que a sob exploração do aquífero, decorrente do número de captações, poderá afetar, de forma negativa e significativa, os habitats caraterísticos destas áreas e consequentemente da fauna que dele dependem. Por outro lado, um plano pode não ter um impacte significativo em sítios Natura 2000 por si só, mas a avaliação pode ser diferente quando considerado em combinação com um projeto de desenvolvimento importante não incluído nesse plano e já proposto ou autorizado.

Sobre os impactes cumulativos identificam-se deficiências na análise apresentada, quer nas áreas totais (vide Quadro 6.26 - Área e representatividade das propriedades agroflorestais do EIA) com projetos implementados ou previstos inseridas na ZEC Comporta-Galé, quer à real afetação dos habitats em presença. Por exemplo, a afetação do habitat 2260 é analisada quando este existe na sua forma isolada, sendo que a afetação existe também quando consociado com outros habitats. Este aspeto pode assumir maior relevância em habitats com menor expressão.

Ainda assim, considerando os valores apresentados no EIA, verifica-se que a eventual aprovação do projeto em apreço eleva a área total afetada pelos projetos agroflorestais implementados e/ou a implementar para cerca de 50% da ZEC Comporta/Galé. Destes, a área agrícola representa também cerca de 12% (cerca de 4000 ha). Os projetos turísticos contabilizam cerca de 12%. É assumido *que "não foram contemplados projetos industriais e infraestruturas lineares, e centrais fotovoltaicas, por ausência de informação consolidada relativa às mesmas",* o que indica que os impactes poderão estar subestimados.

Em face do que se observa dos projetos adjacentes, em caso de aprovação deste projeto, seria expetável que ocorresse uma rápida deterioração da área envolvente, aumentando a afetação de Valores Naturais, colocando ainda mais em causa a integridade da ZEC Comporta/Galé. No contexto da situação atual da ZEC Comporta Galé, considera-se que o projeto, na sua globalidade é bastante impactante.

Os Valores Naturais mais afetados pelo projeto, como o habitat 2260 e as espécies *Santolina impressa e Armeria rouyana,* foram selecionados como valores alvo do Plano de Gestão da ZEC Comporta/Galé (em fase de aprovação), o que traduz a relevância da área para a conservação desses valores ao nível da região biogeográfica em Portugal.

Segundo este Plano, atendendo à cobertura e distribuição em território nacional bem como ao seu grau de conservação, isolamento, raridade, sensibilidade na ZEC e urgência de atuação para a sua conservação, considerou-se que a ZEC Comporta/Galé é importante para a manutenção ou o restabelecimento do estado de conservação favorável destes valores. Referir que para o Habitat 2260 o Plano Sectorial da Rede Natura 2000 aponta para a necessidade de incrementar a área de ocupação deste e melhorar o seu estado de conservação[9].

O estado de degradação segundo o qual o habitat 2260 é classificado na ZEC Comporta/Galé, e pelo qual a área do habitat é classificada como em tendência decrescente, está, geralmente, associado a práticas de desmatação de pinhais com objetivos de limpeza dos povoamentos florestais com vista a evitar os incêndios e, sobretudo nos últimos anos, com grandes áreas a serem convertidas em espaços agrícolas. Apesar disso, a resiliência destas comunidades é reconhecida pela facilidade com que recuperam após a cessação da desmatação regular.

Reconhece-se, pois, a possibilidade de regeneração do habitat, ainda que classificado como degradado. Segundo a informação da Lista Vermelha da Flora Vascular de Portugal Continental, a nível nacional existe uma tendência decrescente da população de *Armeria ro*uyana essencialmente em consequência de alterações no uso do solo, decorrente das suas principais pressões, como a instalação de novas explorações agrícolas.

[9] Ficha Plano Sectorial Rede Natura 2000 – Habitats Naturais 2260. Disponível em: https://www.icnf.pt/api/file/doc/922f99399b07b4dc

Relativamente à espécie *Santolina impressa*, apesar do seu estatuto de Pouco Preocupante, é uma planta endémica de Portugal continental, que apresenta uma distribuição restrita, sensivelmente entre Setúbal e Sines. Dado estar adaptada a áreas ciclicamente perturbadas, não se prevê que o projeto possa afetar significativamente esta espécie em particular. No entanto, a longo prazo os impactes negativos da presença de uma cultura agrícola regada poderão fazer-se sentir sobre os núcleos desta espécie, quer pela alteração das condições ecológicas locais, quer pelo aumento da perturbação causada pela circulação de maquinaria e pessoas.

Quanto às medidas de minimização específicas para as espécies prioritárias e habitats classificados, considera-se que a proposta do proponente de atualização da cartografia dos valores naturais da situação de referência apresentada no EIA, na fase de preparação de implantação do projeto, apesar de necessária, reconhece o potencial evolutivo da área quer no que respeita ao banco de sementes potencialmente existente na zona quer à regeneração/evolução positiva de habitats.

Considerando o projeto em análise e os impactes associados ao mesmo, há que ter em conta, para além das orientações/obrigações decorrentes da Diretiva Aves e Habitats e do Plano Sectorial da Rede Natura 2000, outros documentos (i.e. estratégias e planos) que norteiam a conservação da natureza em Portugal, nomeadamente a Estratégia de Biodiversidade da União Europeia para 2030, Estratégia Nacional de Conservação da Natureza e Biodiversidade 2030 e Plano Nacional de Restauro da Natureza (a desenvolver).

Relativamente à Estratégia de Biodiversidade da União Europeia para 2030, as orientações desenvolvidas pela Comissão em cooperação com os Estados-Membros e as partes interessadas para apoiar o cumprimento desses objetivos salientam ser provável a necessidade de esforços de manutenção e restauro da maior parte desses habitats e espécies, travando as suas tendências negativas atuais até 2030 ou mantendo as tendências estáveis ou de melhoria atuais, ou ainda impedindo o declínio dos habitats e espécies com um estado de conservação favorável.

A Estratégia Nacional de Conservação da Natureza e Biodiversidade 2030 (ENCNB), aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 55/2018, de 7 de maio, reconhece que o despovoamento dos territórios surge como importante ameaça à biodiversidade, a par da alteração dos sistemas naturais, e exponenciada pelas alterações climáticas e pela proliferação de espécies exóticas invasoras, sendo um dos principais eixos estratégicos desta estratégia *"Melhorar o estado de conservação do património natural"* (Eixo 1), *«objetivo último a concretizar no quadro desta Estratégia»*.

De referir que compete ao ICNF, I.P., enquanto autoridade nacional para a conservação da natureza e biodiversidade e autoridade florestal nacional, implementar, em particular [conforme disposto no artigo 4.º, n.º 1, alínea a), do Decreto-Lei n.º 43/2019, de 29 de março], a ENCNB. Mais, apesar de Portugal ainda não dispor do seu Plano Nacional de Restauro da Natureza (a desenvolver até agosto de 2026), importa atender a que uma das premissas definidas no Regulamento do restauro da natureza (Regulamento (UE) 2024/1991 do Parlamento Europeu e do Conselho, em vigor desde 18 de agosto de 2024, que determina um conjunto de metas e de medidas que visam a recuperação de habitats degradados e o combate à perda de biodiversidade no espaço europeu), assenta na prioridade às medidas de restauro em áreas localizadas na Rede Natura 2000.

Do exposto, compete ao Estado Português zelar pelo património natural presente no território, especialmente aquele que determinou a classificação de áreas, como as que pertencem à Rede Natura 2000, ao abrigo dos compromissos internacionais assumidos perante a União Europeia e, entre outros, do consagrado no Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na sua redação atual (Regime Jurídico da Rede Natura).

Ainda, em matéria de ambiente, determina o artigo 3.º, alínea c), da Lei n.º 19/2014, de 14 de Abril (que define as bases da política de ambiente) que a atuação pública em matéria de ambiente está subordinada aos princípios "*da prevenção e da precaução, que obrigam à adoção de medidas antecipatórias com o objetivo de obviar ou minorar, prioritariamente na fonte, os impactes adversos no ambiente, com origem natural ou humana, tanto em face de perigos imediatos e concretos como em face de riscos futuros e incertos, da mesma maneira como podem estabelecer, em caso de incerteza científica, que o ónus da prova recaia sobre a parte que alegue a ausência de perigos ou riscos".*

Também, e à semelhança do que acontece com a generalidade da legislação ambiental da UE, a Diretiva Habitats baseia-se no princípio da precaução, ou seja, a ausência de provas científicas sobre o efeito negativo significativo de uma ação não pode ser utilizada como uma justificação para a aprovação dessa ação. Resulta que na ausência de certeza quanto à eventualidade de ocorrerem quaisquer efeitos negativos, o plano ou o projeto não pode ser aprovado.

Ainda, e no que respeita à afetação de quercíneas, apesar da garantia, indicada no EIA, da não necessidade de abate, não é avaliada a potencial afetação indireta sobre os exemplares destas espécies existentes na área de plantação, nomeadamente nos sectores de plantação que se sobrepõem ao uso *"Pinheiro manso + sobreiro".*

Conclusão

Face ao exposto, para o fator Sistemas Ecológicos, emite-se parecer desfavorável ao Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo, instruído em projeto de execução.

QUALIDADE DO AR

Situação de referência

Foram consultados os dados sobre a Qualidade do Ar da estação de Monte Velho, entre 2015 e 2021, verificando-se que a área em avaliação se encontra numa zona em que Índice de Qualidade do Ar (IQAr) obteve a classificação, na maior parte dos dias, de "Muito bom", correspondendo a 261 dias no ano de 2024, tendo em 89 dias, do mesmo ano apresentado a classificação de "Bom", para os poluentes NOx, SO_2, PM10, O_3 e CO.

Os ventos dominantes são do quadrante noroeste (NW), seguidos dos ventos do quadrante sudoeste (SE), e os recetores sensíveis que se encontram a menor distância do Projeto localizam-se a mais de 1 Km.

Avaliação de impactes

Fase de construção

As ações/atividades passíveis de originar diferentes emissões de poluentes atmosféricos são: Desmatação, decapagem, remoção da vegetação numa área de 360,63 ha; Preparação do solo/lavoura do terreno para plantação das culturas; Realização de escavações e aterros para implantação das infraestruturas previstas no projeto; Movimentação de terras e modelação superficial do terreno para implantação/beneficiação dos caminhos e acessos; Circulação de tráfego de veículos/maquinaria, funcionamento de máquinas e equipamentos agrícolas; Presença de depósitos provisórios de terras; Implantação e funcionamento dos locais de apoio à obra.

Toda a envolvente ao Projeto apresenta ocupação florestal, o que proporciona algum efeito barreira à dispersão de partículas e outros poluentes para o exterior da área de intervenção e, consequentemente, de minimização de eventuais impactes para estes recetores sensíveis existentes. Assim, os impactes resultantes da emissão de partículas em suspensão e dos gases de combustão serão negativos pouco significativos.

Fase de Exploração

Na fase de exploração identificam-se como ações geradoras de impactes, as operações mecanizadas necessárias no processo de manutenção/produção do pomar. Associado a estas atividades, assume menor expressão as emissões de partículas em suspensão, no entanto, esses quantitativos serão muito baixos.

Considerando-se que o gasóleo será o combustível de maior utilização nas operações mecanizadas e estimando-se um consumo de 78,52 ton (admitindo 240 dias/ano de trabalho, 6h/dia de trabalho, que funcionam 7 máquinas/dia (1 máquina/50 ha) e que as máquinas consomem 9L/h de gasóleo nos 360,63 ha de área agrícola), então o total de emissões de CO_2 associadas ao consumo deste combustível é de 248,09 ton CO_2eq/ano (fator de emissão de 74,1 Kg CO_2eq/GJ, fator de oxidação de 0,99, poder calorífico inferior (PCI) de 43,07 GJ/t e densidade de 0,84 Kg/L).

De uma forma geral, perspetiva-se que um reduzido acréscimo cumulativo do aumento das concentrações de poluentes atmosféricos, não provocando alterações na qualidade do ar local e regional, prevê-se um impacte negativo pouco significativo.

Medidas de Minimização

Concorda-se com as medidas apresentadas no EIA, destacando-se as da fase de construção.

Conclusão

Face ao exposto, para o fator Qualidade do Ar, emite-se parecer favorável ao Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo, condicionado ao cumprimento das medidas de minimização.

RUÍDO

Situação de referência

Para identificar a situação de referência, o EIA efetuou medições acústicas em 3 pontos que pretendem caracterizar o ambiente sonoro junto de recetores sensíveis potencialmente mais afetados pelo Projeto: P1 Povoação de Moitinha, com valores: Ld = 50, Le = 47, Ln = 46, Lden = 53 dB (A); P2 Povoação de Cachopos, com valores: Ld = 46, Le = 44, Ln = 43, Lden = 50 dB (A); P3 No interior da herdade, não considerado como recetor sensível.

Os ventos dominantes são do quadrante noroeste (NW), seguidos dos ventos do quadrante sudoeste (SE), o que implica que as áreas situadas a SE e NW do Projeto sejam mais afetadas pelas emissões de ruído.

Os recetores sensíveis mais próximos do Projeto é o P2 Povoação de Cachopos, a cerca de 1250 m a este (E).

Avaliação de impactes

Fase de construção

Nesta fase ocorrerão um conjunto de atividades ruidosas temporárias, associadas à preparação do terreno para plantação dos pomares, onde se destacam as operações de desmatação, decapagem do solo, terraplanagem, lavoura/ripagem dos solos para plantio e aberturas de valas para instalação das infraestruturas e furos para rega.

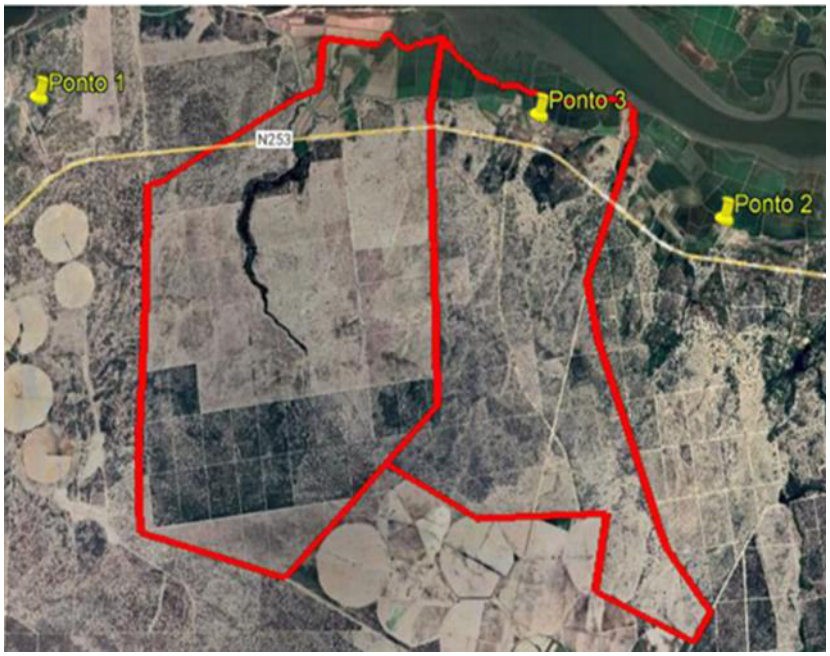


Figura 8 - Localização das medições acústicas

Segundo indicado no EIA, a fase de construção decorrerá durante cerca de 8 h em período diurno. Nesta fase prevêem-se que os impactes sejam improváveis e negligenciáveis junto dos recetores sensíveis.

Fase de Exploração

Na fase de exploração serão instalados, na área agrícola, 20 ventiladores anti geada, entre dezembro e março, após um período experimental de 2 anos de permanência a tempo inteiro.

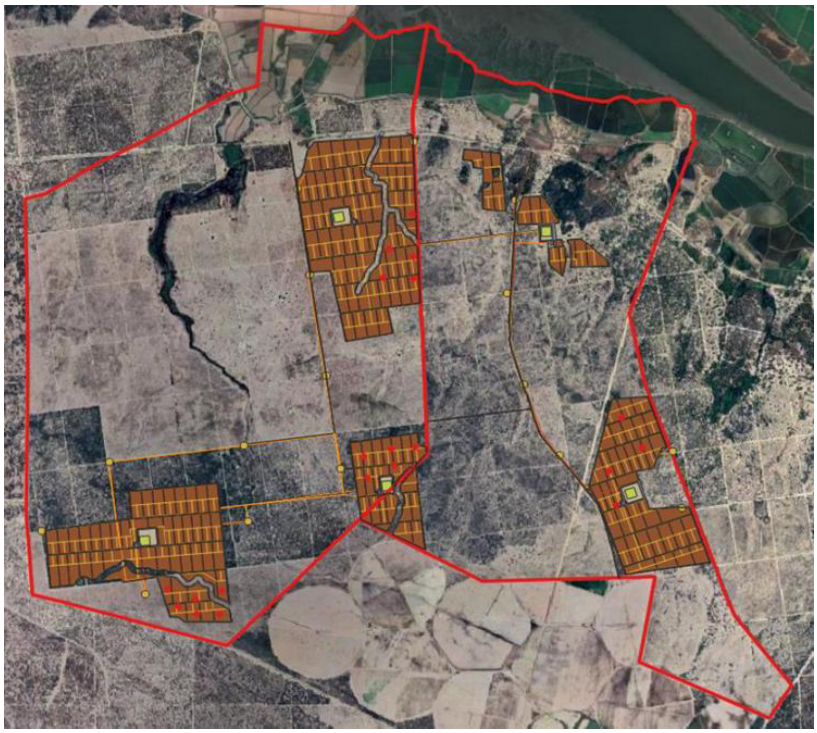


Figura 9 - Distribuição dos 20 ventiladores - pontos encarnados

Durante esta fase, e apesar de ser referido no EIA que a mesma será caraterizada por *"… longos períodos de desenvolvimento das plantações, sem ações geradoras de ruído…",* o mesmo não é totalmente verdade, uma vez que irão ser gerados níveis de ruído sempre que ocorram condições climatéricas específicas, favoráveis às condições de formação de geadas, e que ocorrerão, naturalmente, em períodos de desenvolvimento das plantações.

Também, e contrariamente ao indicado no EIA, os valores limite de exposição a cumprir/verificar pelo Projeto, relativamente a recetores sensíveis são Lden= 63 dB (A) e Ln=53 dB (A), por estarem localizados fora de perímetros urbanos, de acordo com o n.º 2 e n.º 3 do artigo 11.º do Regulamento Geral do Ruído (RGR), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro.

Devido à modelação apresentada no EIA/Aditamento (Quadro 6.26 - Configurações de cálculo utilizados na modelação de ruído), não ter tido em conta as condições de propagação sonora do funcionamento das 20 ventoinhas anti geada (classes de estabilidade atmosférica E e F, segundo tabelas de classificação de Pasquill), no período noturno, considera-se ser expectável a ocorrência de impactes negativos de pouco significativos a significativos.

Medidas de Minimização e Plano de Monitorização

Concorda-se com as medidas apresentadas no EIA.

É proposta a monitorização dos níveis de ruído junto do P2 Povoação de Cachopos, entre os meses de novembro e fevereiro e durante o período noturno (entre as 23h e as 07h). Os resultados/registos de medição deverão ser remetidos a esta CCDR IP, no final de cada mês, acompanhado do registo das condições meteorológicas observadas diariamente, contendo a informação: Temperatura e humidade do ar a 1 ou 2 m de altura; Direção e intensidade do vento a 10 m de altura; Ocorrência de geada e as respetivas classes de estabilidade atmosféricas durante a ocorrência das geadas, segundo tabelas de classificação de Pasquill.

Caso se verifique o incumprimento do critério de Exposição Máxima e/ou do Critério de Incomodidade (alíneas a) e b) do artigo 13.º do RGR, aprovado pelo Decreto-Lei nº 9/2007, de 17 de janeiro), deverão ser apresentadas, no espaço de 30 dias, soluções que demonstrem o cumprimento do indicado no RGR.

Conclusão

Face ao exposto, para o fator Ruído, emite-se parecer favorável ao Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo, condicionado ao cumprimento das medidas de minimização e do plano de monitorização.

PATRIMÓNIO

Projeto

Administrativamente, o local de implementação do Projeto Agroflorestal HM-MN pertencente ao distrito de Setúbal, insere-se na NUT II - região do Alentejo e NUT III - sub-região Alentejo Litoral, concelho de Alcácer do Sal, freguesia de Comporta e União das freguesias de Alcácer do Sal (Santa Maria do Castelo e Santiago) e Santa Susana, aproximadamente a 5 km de Comporta e a cerca de 15 km de Alcácer do Sal.

A propriedade de implantação do Projeto tem uma área total de 2402,10 ha, de acordo com as cadernetas prediais, sendo enquadrada pelas Folhas n.º 466, 467, 475 e 476 da Carta Militar de Portugal e, abrange os prédios rústicos denominados “Herdade da Murta” e “Herdade de Monte Novo do Sul”, todos da freguesia de Santa Maria do Castelo e Santiago e Santa Susana, descritos respetivamente na Conservatória do Registo Predial de Alcácer.

Na área da propriedade, onde se pretende implantar esta cultura agrícola, o pinheiro manso constitui a espécie predominante e mais frequente, verificando-se também pontualmente a presença de alguns pinheiros-bravos e sobreiros. Relativamente à vegetação arbustiva, observa-se que algumas áreas da propriedade foram lavradas e estão totalmente desprovidas de vegetação, existindo ainda assim várias manchas com presença de tojo, mato-branco, urze, tomilho, tojo-chamusco, cistáceas entre outras espécies arbustivas e herbáceas.

O Projeto localiza-se em área classificada no âmbito da Diretiva Habitats, nomeadamente na Zona Especial de Conservação (ZEC), designada por Comporta-Galé (PTCON0034, pelo que é aplicável o regime jurídico da Rede Natura 2000, o Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, republicado pelo Decreto-Lei n.º 49/2005, de 24 de fevereiro.

O Projeto contempla uma área de intervenção total de 433,30 ha, representando cerca de 18% do total da área das Herdades, onde se engloba a área agrícola (360,63 ha) e a área de infraestruturas associadas (72,67 ha). Em síntese, no que respeita às características gerais do Projeto em análise, referem-se as seguintes: Insere-se em duas propriedades privadas que apresentam uma área de 2405,83 ha, contempla uma área total de intervenção agrícola que representa 433,30 ha, sendo 360,63 ha de área efetiva de plantação de tangerina e 72,67 ha de área com estruturas e infraestruturas de apoio ao projeto; A rega dos setores de plantação será realizada pelo sistema gota-a-gota, com origem em 16 captações de água subterrânea, do tipo furo vertical; A água para rega será armazenada em 5 reservatórios impermeabilizados; A rede elétrica prevê utilizar a instalação de uma linha aérea de média tensão existente na zona norte da propriedade, junto à EN253. Simultaneamente, está prevista a instalação de painéis fotovoltaicos, a colocar sobre o plano de água dos 5 reservatórios de armazenamento de água e sobre a cobertura das 5 casas de rega. O projeto elétrico desenvolve-se a partir dos postos de transformação e, contempla uma rede de média tensão subterrâneas e uma rede de baixa tensão, também subterrânea, para alimentar os equipamentos previstos (bombas submersíveis dos furos, bombas dos reservatórios de armazenamento de água, bombas da fertirrega, bombas de filtração, tomadas e iluminação); Relativamente a combustíveis fósseis, refere-se que os veículos, máquinas e equipamentos serão abastecidos por camião-cisterna, em função das necessidades; As estruturas de apoio à exploração serão constituídas por 5 casas de rega/bombagem e de apoio agrícola, 5 reservatórios de armazenamento de água para rega, 1 Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC), postos de transformação de energia, bacias de preparação de caldas com zona de lavagem de pulverizadores, fossas sépticas, caminhos interiores e exteriores/perimetrais aos setores; O início da construção/implantação do projeto, está previsto para o primeiro semestre do ano de 2026, dependendo em rigor, do atual procedimento de AIA.

Situação de referência

De acordo como o EIA a *«caracterização do património histórico-cultural nas vertentes arqueológica, arquitetónica e etnográfica existente na área de incidência do Projeto Agroflorestal (…), baseiam-se em pesquisa bibliográfica, prospeção arqueológica e reconhecimento de elementos edificados».*

Nesta última fase de prospeção arqueológica sistemática foi efetuado o *«reconhecimento dos dados recolhidos durante a fase de pesquisa documental»* e a verificação *«dos indícios toponímicos e fisiográficos que apontam para a presença no terreno de outros vestígios de natureza antrópica (arqueológicos, arquitetónicos ou etnográficos) não detetados na bibliografia».* Seguiu-se a *«recolha de informação procede-se ao registo sistemático e à elaboração de um inventário (compilação dos elementos identificados)». O inventário foi «materializado numa Carta do Património Arqueológico, Arquitetónico e Etnográfico».*

Para o trabalho de caracterização efetuado pelo EIA, foi considerada como *«área de estudo restrita (AER) o conjunto de setores delimitados na cartografia do Património e alvo de trabalhos arqueológicos de prospeção sistemática, e como área de estudo alargada (AEA) o território de enquadramento do projeto, numa distância até cerca de 3 km em relação à AER, para mapeamento do património identificado em pesquisa documental».* O EIA entendeu a área de incidência direta (AID) como sendo a *«localização das ações e infraestruturas inerentes ao projeto».* Como *«área de potencial incidência indireta (AII)»* como a correspondente *«a uma envolvente de 50 metros em torno da AID».*

O Projeto localiza-se numa área regional com elevada sensibilidade arqueológica, associadas à navegabilidade e exploração do rio Sado, destacando-se, dos sítios arqueológicos referenciados na envolvente, o notável estabelecimento fenício dos séculos VII e VI a. C.de Abul (CNS 2924), que se encontra Em Vias de Classificação.

O EIA salienta que o Projeto não afeta, e nem se aproxima, de qualquer área sensível associada a bens imóveis classificados ou em vias de classificação.

As condições de visibilidade do solo no momento da prospeção *«variam consoante as manchas de ocupação florestal que ocupam os solos destas herdades, mas tendo em conta a época do ano, a visibilidade do solo apresenta-se razoável em alguns setores e pouco favorável noutros, estando a maioria do terreno coberta de vegetação rasteira e pequenas arbustivas».*

Destes trabalhos não resultou a identificação de *«quaisquer vestígios arqueológicos ou elementos edificados com significado patrimonial na área de inserção do projeto», apenas se tendo verificado «a presença residual de fragmentos de cerâmica recente que corresponde a recipientes de barro para recolha da resina dos pinheiros mansos».*

Salienta-se que na denominada *«Área de Habitats a conservar e/ou a valorizar*», situadas a norte, confinantes com as áreas compostas por arrozais existentes a manter do Aproveitamento Hidroagrícola Vale do Sado (184,56 ha) localizam-se dois sítios arqueológicos inventariados:

- Atalaia de Murta (CNS 38635) - *«Troço de atalaia de planta circular, edificada em silharia de pedra, ligada por argamassa, situado em cerro elevado junto ao estuário do Sado. Sobre o troço assenta moinho edificado nas Idades Média e Moderna. A torre assenta num piso de cronologia anterior e possui 8 m de diâmetro e uma altura conservada de 0,65 m. A envolver aquela está um pequeno recinto, com aparelho construtivo similar e com 21 m de diâmetro." O sítio foi identificado, em 2019, na sequência das prospeções arqueológicas efetuadas no âmbito do projeto de investigação "A Organização do Território no Sudoeste do Gharb Al-Andalus: povoamento rural e paisagens fortificadas na kura de Alcácer do Sal".»* Fonte: Endovélico/Portal do Arqueólogo.
- Monte Novo do Sul (CNS 16974) - *«Pequeno cabeço, cortado na vertente oeste pelo traçado do oleoduto. Apresenta contacto visual com a estação arqueológica de Abul, localizando-se na margem oposta deste sítio. Topograficamente apresenta evidente vocação marítima visto que se localiza a escassos metros das margens do Rio Sado. Poderá constituir uma habitação unifamiliar semelhante a outras identificadas na zona da Comporta. Foi identificada cerâmica manual com algum rolamento.»* Fonte: Endovélico/Portal do Arqueólogo.

Da pesquisa bibliográfica e documental resultou a inventariação de oito elementos patrimoniais (Quadro 5.124), maioritariamente construções contemporâneas de onde se destacam os seguintes: M_MNS5 - Atalaia de Murta (CNS 38635), atalaia de planta circular, do Período Islâmico; M_MNS7 - Capela de Monte Novo Sul, edificação contemporânea; M_MNS8 - Monte Novo do Sul (CNS 16974), possível habitat onde foi identificada cerâmica manual.

O EIA refere que a *«identificação e avaliação de situações impactantes são efetuadas através do cruzamento da informação compilada, relativa à localização e ao valor de ocorrências patrimoniais, com a informação disponível sobre as obras programadas» onde são avaliadas «as fases das quais podem resultar impactes sobre as ocorrências patrimoniais registadas»,* nomeadamente as fases de construção, de exploração e de desativação.

Apresenta no *«Quadro 6.39 - Parâmetros qualitativos e quantitativos para aferição do valor patrimonial»,* os vários *«critérios aplicados na atribuição do valor patrimonial dos sítios, estruturas e monumentos em estudo»*, sendo esta uma das tarefas inerentes à avaliação de impactes.

Avaliação de impactes

Na fase de construção o EIA considera como potencialmente geradoras de impactes, as ações/atividades de projeto: *«Remoção da vegetação existente e limpeza do terreno, associada a uma mobilização do solo; Movimentação de terras e modelação superficial do terreno para implantação dos pomares e respetiva rede de rega; Realização de escavações e aterros para implantação das infraestruturas e outras estruturas previstas no projeto; Construção de infraestruturas de adução de água, rede de rega gota-a-gota, rede elétrica e rede viária.»*

Na fase de exploração que *«os impactes decorrentes da fase de construção inviabilizam à partida a conservação de vestígios arqueológicos, uma vez que as intervenções no solo implicam a destruição de estruturas e estratigrafia».*

Considera ainda a fase de *«desativação e desmantelamento ou de renovação e/ou reabilitação de equipamentos, que não terão consequências no âmbito do fator ambiental».*

O EIA considera, globalmente, que *«o diagnóstico do fator ambiental aponta para um impacte pouco significativo resultante da ausência de vestígios arqueológicos ou elementos edificados na área de incidência do projeto».* Avalia os impactes em síntese: Negativo; Magnitude Reduzida; Permanente; Irreversível; e Pouco Significativo.

Medidas de Minimização

Para a fase de construção o EIA preconiza a medida FC25 *«Define-se a medida genérica de acompanhamento arqueológico de obra. O acompanhamento arqueológico deve ser um procedimento inerente a todas as etapas da obra que impliquem a mobilização de solos (escavação, aterro, terraplenagem).»*

Para a fase de exploração, o Aditamento ao EIA reviu a avaliação de impactes «*de forma a acomodar a abordagem dos conteúdos do Plano de Gestão Florestal (PGF)»,* bem como apresentadas as respetivas medidas de minimização, dado que o Plano de Gestão Florestal (PGF) é implementado na situação atual da AE.

No Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo, de 6 de novembro de 2023 (Anexo I-9 do EIA) consta a seguinte medida (pp. 20-21) relativa aos sítios Atalaia de Murta (CNS 38635) e Monte Novo do Sul (CNS 16974) consta: *«Como medida de proteção, deverá ser criado um sistema de demarcação física com fita sinalizadora, de forma a restringir a área a ações florestais, à circulação de máquinas e pisoteio, interferindo o mínimo possível com o sítio, averiguação do estado de conservação dos sítios por arqueólogo, acompanhamento arqueológico das operações que impliquem a mobilização/ revolvimento de solos/subsolos e na limpeza de matos e promoção de ações de sensibilização ambiental para os trabalhadores envolvidos no processo. Em torno deste local, deverá ser providenciada uma faixa de proteção com a largura de 7 m.»*

Atendendo a que as condições de visibilidade no momento da prospeção arqueológica (Desenho 18 do EIA) foram muito condicionadas pela vegetação, tendo sido em grande parte da área consideradas adversas ou muito adversas e à natureza dos vestígios arqueológicos, muitas vezes estes encontram-se ocultos no solo e no subsolo, é conveniente ter prever um conjunto de medidas preventivas e de minimização de possíveis impactes não identificados na fase de avaliação, designadamente nas ações que envolvam a respetiva mobilização ou escavação. Assim, considera-se que as medidas preconizadas pelo EIA deverão ser ajustadas e complementadas por outras para as diversas fases, em conformidade com a tipologia do projeto, de carácter agroflorestal que envolvem regadio.

Conclusão

Face ao exposto, para o fator Património, emite-se parecer favorável ao Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo, condicionado ao cumprimento das medidas de minimização.

SOLOS E USO DO SOLO

Projeto

O Projeto desenvolve-se nas Herdades de Murta e Monte Novo, com área total de 2402,10 ha[10], conforme cadernetas prediais, e envolve uma área total de intervenção agrícola que representa 433,30 ha.

O Projeto tem o seguinte zonamento funcional: 360,63 ha de pomar de citrinos regado; 72,67 ha de caminhos, apoios agrícolas, áreas e servidão e estruturas de armazenamento de água e rega do pomar; 1650,13 ha de área florestal de produção; 366,12 ha de promoção e valorização de zonas de conservação atualmente fragmentadas.

Para efeitos de implementação do zonamento agrícola será realizado: Execução de 16 furos de captação de água subterrânea para rega; Preparação do solo (desmatação, gradagem, limpeza de material lenhoso, lavoura e correção do solo); Construção de 5 reservatórios de armazenamento de água e de 5 casas de rega/bombagem; Construção, reconversão e beneficiação da rede de caminhos internos e externos da propriedade.

[10] Existe uma ligeira diferença de cerca de 3,73 hectares entre a área de registo das cadernetas prediais com 2402,10 hectares e a área cartografada com base no cadastro da DGT com 2405,83 hectares. Uma vez que essa diferença é inferior a 5%, encontra-se dentro da tolerância admitida pela Direção Geral do Território para a medição de áreas dos prédios, bem como do artigo 28-A, alínea b do Decreto-Lei nº 224/84 de 6 de julho. Todos os cálculos do presente documento foram realizados com base na área cartografada com base no cadastro da DGT

O projeto contempla a implantação de 172 setores com plantações de tangerina, a área média dos sectores de plantação é de 2,05 ha. A plantação de tangerina (*Citrus reticulata*), variedade 'Nadorcott', nos vários setores dá-se com um compasso de plantação de 6 m por 3 m, um valor dentro da média praticada em Portugal.

Sobre o plano de preparação do solo: Delimitação do terreno e marcação das espécies arbóreas a abater; Desmatação (corte de árvores, arranque de cepos e limpeza de matos); Gradagem ligeira para remoção da cobertura vegetal na linha; Limpeza de algum material lenhoso ainda existente à superfície do terreno; Subsolagem cruzada com *ripper* na linha, a uma profundidade média de cerca de 60 cm e numa largura coincidente com a largura do camalhão, a entrelinha não sofrerá qualquer operação de ripagem, apenas irá passar o corta-mato; Lavoura (na largura do camalhão) com incorporação de composto orgânico (com 1 m de largura centrado com a linha de plantação) a uma profundidade de 20 cm; Construção de camalhões para plantação com uma largura de 2,50 metros.

É referido que a desmatação se irá desenvolver na área do zonamento agrícola (433,30 ha) e contempla o arranque de cepos e limpeza manual de ramos, sem a sua incorporação no solo.

No plano de fertilização dos solos está previsto incorporar Composto Orgânico (Ferbio), na quantidade de 40 ton/ha, nas fases de construção e de exploração, a fertilização dos pomares será efetuada por fertirrega e adubação foliar.

Sobre a utilização de fitofármacos, indica o EIA *«Utilização de produtos fitofarmacêuticos (inseticidas, acaricidas, fungicidas, herbicidas) para a plantação de tangerinas, embora se preveja que o seu uso seja reduzido, apresenta-se, no Quadro 4.3 alguns dos fitofármacos que se prevê poder vir a utilizar, com base na sua experiência na gestão de outros pomares de tangerina.»* Adicionalmente, apresenta calendário anual previsional da aplicação.

Produtos	Meses											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ALIGN												
CITROLE												
CARNADINE												
ALIETTE FLASH												

Quadro 1 - calendário anual previsional para a aplicação dos inseticidas, acaricidas e fungicidas

Sobre a eliminação e/ou controlo de infestantes nos pomares, uma vez que o EIA na fase de construção prevê as operações de preparação do solo (subsolagem, lavoura e gradagem) e na fase de exploração que irá (possivelmente) existir malha antierva em todo o camalhão e enrelvamento espontâneo nas entrelinhas questionou-se sobre a necessidade de utilização de herbicidas, o Aditamento do EIA indicou *«(…) Embora a redução da competição de infestantes possa ser realizada através de técnicas manuais e orgânicas, a utilização de herbicidas apresenta melhores resultados em termos de vigor vegetativo das árvores, bem como da sua produtividade, e uma redução significativa dos custos de mão-de-obra (Parajudi, 2025). Apesar de corresponder a uma prática com menor custo e maior eficiência, apresenta maiores riscos de utilização sendo essencial a sua utilização responsável, e o respeito das normas ambientais, estabelecidas para cada herbicida utilizado. Importa ainda salientar que a aplicação de herbicida na cultura será feita apenas na parte superior do camalhão, ou seja, a cerca de 20 cm de profundidade, uma vez que o projeto já contempla a utilização de malha antierva e a manutenção ase espécies na entrelinha.».*

A produção estimada em ano cruzeiro é de 60 ton/ha.ano, o que se considera um valor estimado elevado comparado com um valor expectável entre 30 a 40 ton/ha/ano.

Sobre as necessidades hídricas, o EIA indica que a rega será feita consoante as necessidades hídricas das plantas, ou seja, em função das características edafoclimáticas da região e das próprias plantas. A dotação de referência anual assumida no Projeto é de 6310 m^3/ha/ano, valor retirado das Tabelas que foram pulicadas no âmbito da Intervenção C.1.1.1.2 - Uso Eficiente da Água, da Portaria n.º 54-C/2023, de 27 de fevereiro - região 5 - Cenário B, a aplicar a condições climáticas secas - pior cenário. O sistema de rega é gota-a-gota, com duas linhas regantes.

Para a prevenção de geadas o promotor irá instalar 20 ventiladores como solução antigeada. Os ventiladores são movidos a gasóleo e estão distribuídos pelas áreas de plantação. Sobre a distribuição de ventiladores indica o Aditamento do EIA, *«Relativamente ao parecer técnico solicitado neste ponto específico, informa-se que o número de ventiladores, bem como sua localização, foram definidos com base nos resultados de um estudo desenvolvido pela empresa AG GROUP e que envolveu uma análise termométrica, combinada com uma análise topográfica, por forma a definir os locais mais vulneráveis ao desenvolvimento de fenómenos de geada. Contudo, os dados concretos deste estudo não foram disponibilizados ao promotor.»*

Situação de referência

Solos

De acordo com as Cartas de Solos da Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, na área do Projeto ocorrem essencialmente Solos Podzóis: Ap - Solos Podzolizados (Podzóis Não Hidromórficos), Sem Surraipa, Normais, de areias ou arenitos); Aph - Solos Podzolizados (Podzóis Hidromórficos, Sem Surraipa, de areias ou

arenitos); Pz - Solos Podzolizados (Podzóis, (Não Hidromórficos), Com Surraipa, com A2 bem desenvolvido, de areias ou arenitos); Pzh - Solos Podzolizados (Podzóis, Hidromórficos, Com Surraipa, de areias ou arenitos); Asa - Solos Halomórficos (Salinos, de Salinidade Moderada, de Aluviões, de textura pesada).

Os solos Podzóis são solos evoluídos de textura muito ligeira, predominando as frações areia grossa e fina com razão C/N elevada, capacidade de troca catiónica e capacidade de campo muito baixas, expansibilidade nula e permeabilidade rápida. O horizonte B é pardo, arenoso, frequentemente com blocos de surraipa branda ou compacta ou então massa contínua de surraipa. São solos pobres em elementos orgânicos.

Sobre as classes de capacidade de uso do solo (Desenho n.º 14.1 do EIA), verifica-se que na área afeta ao Projeto maioritariamente está presente a classe *E*, de menor capacidade de uso, seguindo-se o solo de classe *D*. Assim, a principal limitação destes solos encontra-se ao nível da zona radicular. Na generalidade, são solos que apresentam limitações severas a muito severas, de modo geral não suscetíveis de utilização agrícola ou suscetíveis de utilização agrícola pouco intensiva, e com risco de erosão elevado a muito elevado.

Relativamente à área de inserção do projeto em Reserva Agrícola Nacional (RAN), é referido que esta condicionante está representada maioritariamente a norte da EN253 (197,04 ha) ocupados pelo perímetro de rega com cultura de arroz, para os quais não está prevista ocupação agrícola ou qualquer tipo de implantação de infraestrutura.

Componentes do Projeto	COD1_solos	COD2_Solos	COD3_Solos	Área afetada (ha)	Percentagem de afetação (%)
Sectores	Ap			84,065	20,602
	Ap	Pz		149,397	36,613
	Pz			95,141	23,316
	Pz	Ap		31,309	7,673
	Pzh			0,719	0,176
Casa de Rega\Bombagem e de Apoio Agrícola	Ap			0,075	0,018
	Ap	Pz		0,210	0,051
	Pz	Ap		0,060	0,015
Casa para portaria	Ap			0,005	0,001
	Pz	Ap		0,002	0,001
Reservatório de Armazenamento de Água	Ap			0,275	0,067
	Ap	Pz		5,297	1,298
	Pz			2,526	0,619
	Pz	Ap		1,500	0,368
Caminhos Novos - Interiores aos Sectores	Ap			6,974	1,709
	Ap	Pz		12,462	3,054
	Pz			6,084	1,491
	Pz	Ap		3,092	0,758
	Pzh			0,150	0,037
Caminhos Exteriores	Ap			0,661	0,162
	Ap	Pz		3,085	0,756
	Pz			2,885	0,707
	Pz	Ap		0,847	0,208
Rede Rega*	Ap			0,132	0,032
	Ap	Pz		0,741	0,182
	Pz			0,257	0,063
	Pz	Ap		0,080	0,020
Construções-Furo e Casa Quadro Furos	Ap			0,002	0,000
	Ap	Pz		0,003	0,001
	Pz			0,002	0,001
	Pz	Ap		0,000	0,000
TOTAL				408,041	100,000

Quadro 2 - Identificação e quantificação dos solos afetados pelo Projeto

Uso do Solo

Relativamente ao Uso do Solo, o EIA caracterizou a ocupação atual do solo com base na análise da carta CORINE Land Cover (CLC) 2018, cuja informação foi aferida por levantamentos de campo.

Na área do Projeto, o uso do solo dominante é o Florestal, com predominância do pinheiro-manso e de pinheiro-bravo, associados a espécies de tojo, zimbrais, tomilho, lavanda, cistáceas entre outras arbustivas e herbáceas.

Na Herdade de Monte Novo, verifica-se a existência de pequenas manchas com exemplares de sobreiros.

Avaliação de impactes

Solos

Os principais impactes ocorrem na fase de construção e salientam-se os seguintes: Alteração da composição e estrutura do solo devido às ações de preparação do solo, os trabalhos de desmatação, decapagem de terrenos e de movimentação de terras tornarão os solos mais suscetíveis à ação dos agentes erosivos, podendo acentuar ou determinar processos de erosão e arrastamento de solos; Ocupação direta e permanente de solos nas áreas onde serão implantadas as infraestruturas e equipamentos do projeto; Circulação de maquinaria agrícola, provocando a compactação dos solos; Contaminação dos solos por eventuais descargas acidentais de betão, óleos e combustíveis ou de outro tipo de contaminantes.

O incremento de processos erosivos que ocorre na área de implantação do Projeto, componente agrícola, representa um impacte negativo significativo, direto, de magnitude moderada, certo, local, temporário e reversível.

Se não for mitigado pode, em determinadas circunstâncias, ter efeito permanente. Considerando a adoção de medidas de mitigação definidas pelo projeto, o impacte será temporário.

Sobre as ações de preparação do solo/correção, desde que adequadamente desenvolvidas (com o cuidado de evitar correções excessivas), traduzem-se num impacte positivo pouco significativo, na medida que corroboram a conservação, melhoria e valorização do recurso solo, ficando este apto para o uso que lhe estava atribuído, florestal e também agrícola. Este impacte positivo classifica-se ainda como certo, local, apresentando magnitude moderada.

Sobre os solos ocupados pelas infraestruturas e equipamentos de apoio à exploração o impacte é negativo, direto, de magnitude reduzida, certo, local e irreversível durante a vida útil do projeto.

Uso do Solo

O Projeto desenvolve-se nas Herdades de Murta e Monte Novo, num total de 2402,10 ha, possuindo a componente agrícola 433,30 ha ou 18% da área total.

Assim, a alteração do Uso Florestal para um Uso Agrícola, originará impactes negativos, de âmbito local, certos, com magnitude reduzida e pouco significativos.

Medidas de minimização e Plano de monitorização

Não obstante as medidas de minimização e/ou valorização propostas no EIA serem adequadas, propõem-se outras complementares relacionadas, na fase de construção com o desnudamento do solo e na fase de exploração com a salinização ou alcalinização dos solos.

Propõe-se, ainda, a reformulação do plano de monitorização indicado no EIA, por forma a contemplar todos os parâmetros técnico-científicos mais apropriados para identificar eventuais situações de contaminação dos solos.

Conclusão

Do ponto de vista agronómico:

- A preparação dos solos proposta é adequada. A densidade de plantas/ha está dentro da média praticada na maioria das plantações desta cultura, mas a produção média estimada em ano cruzeiro é superior às produções médias;
- As necessidades hídricas, a dotação de referência anual assumida, considerando a rega gota a gota, está de acordo com as tabelas de referência;
- Sobre as geadas, prevendo-se instalar 20 ventiladores estrategicamente implantados na área de plantação, será uma medida preventiva;
- Sobre a fertilização, na fase de construção a incorporação do composto orgânico neste tipo de solos, configura uma mais-valia. Na fase de exploração, estando prevista a fertirrega, é importante monitorizar os solos de modo a conseguir avaliar o estado dos mesmo quanto à sua salinização e/ou alcalinização;
- Sobre a aplicação de produtos fitofarmacêuticos, referido o EIA que *«o seu uso seja reduzido»*, considera-se algo otimista em comparação com as práticas culturais habituais nesta cultura em Portugal. De qualquer modo, seja o seu uso reduzido ou não, ele deverá dar cumprimento ao disposto no artigo 17.º da Lei n.º 26/2013, de 11 de abril, na sua versão consolidada, ou seja, todos os aplicadores devem efetuar e manter, durante pelo menos três anos, o registo de quaisquer tratamentos efetuados com produtos fitofarmacêuticos em território nacional;
- Sobre o uso de herbicidas, o EIA indica *«(…) possível implantação de malha antierva»* e o Aditamento do EIA que *«Importa ainda salientar que a aplicação de herbicida na cultura será feita apenas na parte superior do camalhão, ou seja, a cerca de 20 cm de profundidade, uma vez que o projeto já contempla a utilização de malha antierva e a manutenção das espécies na entrelinha de plantação.»*. Assim será preferível, face a natureza dos solos em causa, a utilização de malha antierva, como medida primordial de eliminação e/ou controlo de infestantes nos pomares.

Face ao exposto, para o fator Solos e Uso do Solo, emite-se parecer favorável ao Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo, condicionado ao cumprimento das medidas de minimização e plano de monitorização.

SÓCIOECONOMIA

Situação de referência

O Projeto localiza-se no concelho de Alcácer do Sal, a 5 km de Comporta e a 15 km de Alcácer do Sal.

O investimento total do Projeto é de cerca de 67 M€.

No contexto sociodemográfico, o EIA se baseia essencialmente na informação compilada das estatísticas oficiais e os indicadores que informam a análise são os que habitualmente se utilizam em estudos desta natureza.

No contexto sociodemográfico, o EIA identifica as principais temáticas que se prendem com a evolução demográfica e suas condicionantes, desagregadas ao nível regional, concelhio e de freguesia. Em ambos os contextos, não foram identificadas incorreções ou incongruências.

O EIA integra, ainda, um capítulo específico sobre o setor agrícola.

Prevê-se, na fase de construção, a necessidade de contratar 50 trabalhadores. E na fase de exploração 50 trabalhadores permanentes e 150 trabalhadores temporários. Para os trabalhadores agrícolas, o Proponente pretende adquirir alojamento, com aquisição de um terreno, na zona habitacional de Alcácer do Sal.

Para a colheita em pleno, que se estima 100 ton/dia, prevê-se a utilização de cerca de 5 camiões/dia, na EN 253, até um Centro de Distribuição em Alcácer do Sal, onde serão embaladas e expedidas as tangerinas rececionadas.

Avaliação de impactes

Indica o EIA que:

- *"O Projeto Agroflorestal HM-MN prevê um investimento de 67,5 milhões de euros, entre infraestrutura e trabalhos pré-operatórios, o que trará um impacto económico significativo para a região, impulsionando o crescimento local e dinamizando diversos setores."*
- *"Com receitas estimadas de 83 milhões de euros nos 5 primeiros anos de produção, o projeto não só garantirá um retorno substancial, mas também estimulará a economia através do aumento da atividade comercial, do turismo e do consumo interno."*
- "*A criação de 50 postos de trabalho permanentes e 150 sazonais contribuirá para a redução do desemprego e para o aumento do rendimento das famílias locais."*
- *"O pico da sazonalidade verificar-se-á nos períodos da colheita, que no caso da cultura da tangerina de janeiro a abril, em contraciclo com a época alta do turismo, possibilitando a retenção de pessoas na região todo o ano."*
- *"Os empregos gerados impulsionarão setores como o comércio, a restauração e os transportes, criando um efeito multiplicador na economia. O aumento da procura por bens e serviços incentivará empresas locais a expandirem as suas operações, atraindo novos investidores e consolidando a região como um polo de desenvolvimento sustentável e competitivo a longo prazo."*
- *"A implementação da agricultura de precisão no projeto representa um catalisador para a atração de talentos e a valorização da mão de obra qualificada, promovendo a modernização e a competitividade do setor agrícola na região. A utilização de tecnologia avançada, como sensores, drones e análise de dados, exige profissionais altamente capacitados, incentivando a formação técnica e a especialização da força de trabalho local. Esse processo não só cria oportunidades para jovens qualificados e recém-formados, como também impulsiona a retenção de talentos, reduzindo a fuga de profissionais para outros mercados. Além disso, a interação com centros de pesquisa e universidades fortalece a inovação e fomenta um ecossistema de conhecimento que beneficia toda a cadeia produtiva, garantindo maior eficiência, sustentabilidade e rentabilidade para o setor."*

Assim considera-se ser expectável um impacte positivo significativo na economia local, quer nos serviços pelo efeito da deslocação de trabalhadores, quer nas empresas pelo fornecimento de bens para o desenvolvimento do Projeto.

Medidas de minimização Elemento a apresentar

O Projeto necessitando recrutar 150 trabalhadores sazonais, propõem-se as medidas:

- Em caso de contratação de longo prazo de trabalhadores provenientes de outros pontos do país ou migrantes, cuja necessidade de alojamento se verifica, compromete-se o proponente em apoiar e custear, diretamente ou por terceiros, condições adequadas para habitação temporária dos mesmos;

- Privilegiar, em admissão nas diferentes componentes agrícolas e florestais do projeto, profissionais e empresas do concelho de Alcácer do Sal, a condições justas e equiparáveis às de mercado, sendo as qualificações mínimas dos trabalhadores determinadas de acordo com os requisitos legais da função.

E a necessidade de, antes da fase de construção, o proponente apresentar a localização do alojamento dos trabalhadores agrícolas e do centro de distribuição.

Conclusão

Face ao exposto, para o fator Sócioeconomia, emite-se parecer favorável ao Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo, condicionado ao cumprimento das medidas propostas.

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Situação de referência

O EIA refere-se ao projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, em fase de execução. O principal objetivo é a criação de uma área agrícola de produção de tangerina, tendo como destino o mercado interno e a indústria transformadora. A designação do projeto "Agroflorestal" foi assumida em razão do Plano de Gestão florestal, que está em curso para a propriedade, ser implementado em simultâneo com o projeto agrícola.

O Projeto localiza-se no distrito de Setúbal, no concelho de Alcácer do Sal, abrangendo as freguesias da Comporta e União das freguesias de Alcácer do Sal (Santa Maria do Castelo e Santiago) e Santa Susana.

A área de intervenção agrícola é constituída por 360,63 ha úteis de plantação de tangerineiras, 72,67 ha de infraestruturas de apoio, e 1650,13 ha de área florestal de produção/servidões. De acordo com o EIA, a produção vai aumentando ao longo dos anos, atingindo o seu expoente ao 5º/6º ano, numa produção média de 60 ton/ha de tangerina, não sendo claro qual o período temporal associado a esta estimativa.

Será realizado um conjunto de investimentos em infraestruturas e equipamentos de apoio à atividade agrícola que consistem, nomeadamente, na construção de: 5 reservatórios de armazenamento de água para rega; 5 casas de rega/bombagem; 16 furos de captação de água subterrânea; 3 módulos amovíveis (casa da portaria); 5 bacias para preparação de caldas/zona de lavagem de pulverizadores; 5 fossas sépticas a instalar nas casas de rega/bombagem; 10 postos de transformação (PT); Redes elétricas subterrâneas de Baixa Tensão (BT) e de Média Tensão (MT); Criação de alojamento para trabalhadores;

Está igualmente prevista a instalação de uma Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC), constituída por 9.656 módulos fotovoltaicos, dos quais 8.772 serão instalados sobre o plano de água dos 5 reservatórios previstos para armazenamento de água para rega e 885 sobre a cobertura das 5 casas de rega.

O EIA estima que o período de construção e preparação do terreno ocorra durante o primeiro semestre de 2026 e a plantação no segundo semestre do mesmo ano, estando previsto um período de vida útil do projeto de 25 a 30 anos.

No que diz respeito à análise do descritor Alterações Climáticas, em termos genéricos, o EIA deve enquadrar o projeto nos instrumentos de política climática nacional, bem como, incluir claramente e de forma estruturada as vertentes de mitigação e de adaptação às alterações climáticas, respetivos impactes e vulnerabilidades esperadas, e consequentes medidas de minimização e de adaptação.

A este respeito, e antes de se aprofundar os temas de mitigação e adaptação no âmbito do descritor alterações climáticas nas seções seguintes, é de referir que foram devidamente enquadrados no EIA os principais e mais recentes instrumentos de referência estratégica, que concretizam as orientações nacionais em matéria de políticas de mitigação e de adaptação às alterações climáticas, nomeadamente a Lei de Bases do Clima (LBC), o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050), o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030), bem como a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAAC 2020), o Programa de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas (P-3AC) e o Roteiro Nacional para a Adaptação 2100 (RNA 2100).

Avaliação de impactes

Vertente mitigação das alterações climáticas

A avaliação dos impactes decorrentes de projetos sujeitos a AIA prende-se com a necessidade de calcular as emissões de Gazes com Efeito de Estufa (GEE) que ocorrem direta ou indiretamente nas diversas fases do projeto e que as mesmas sejam analisadas numa perspetiva de mitigação das alterações climáticas. Adicionalmente devem ser tidos em conta todos os fatores que concorrem para o balanço das emissões de GEE, quer na vertente emissora de carbono, quer na vertente de sumidouro, se aplicável.

Para a determinação das emissões de GEE devem ser utilizados, sempre que possível, os fatores de cálculo (e.g. Fator de Emissão e Poder Calorifico Inferior) e as metodologias de cálculo constantes do Relatório Nacional de Inventários (NIR - National Inventory Report), relatório que pode ser encontrado no Portal da APA. No que diz respeito especificamente ao Fator de Emissão de GEE (em tCO_2eq/MWh de eletricidade produzida) relativo à eletricidade produzida em Portugal, devem ser tidos em consideração os valores constantes do documento disponibilizado em:

https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/20250808/fe_gee_eletricidade_2025_final_apc.pdf

Caso seja selecionada uma metodologia de cálculo diferente daquelas acima previstas deve ser apresentada a devida justificação dessa opção.

Com vista a apoiar o processo de análise e promover uma maior harmonização entre os resultados apresentados pelos promotores de projetos, encontra-se disponível no Portal da APA “Calculadora de Emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE)”. Esta calculadora permite estimar as emissões de GEE diretas ou indiretas associadas à atividade de um determinado setor, onde se incluem, por exemplo, as emissões associadas à produção de materiais, ao consumo de combustível ou às deslocações associadas a uma determinada atividade, às atividades de desflorestação, bem como as emissões indiretas do consumo de eletricidade, as emissões evitadas com a implementação de uma alteração tecnológica da atividade em questão, entre outras emissões passíveis de ocorrer em qualquer fase da atividade (construção ou fase preparatória, exploração e desativação).

Fase de construção

O EIA considerou os impactes resultantes da utilização de combustíveis fósseis na operação de veículos, máquinas e outros equipamentos necessários às atividades previstas nesta fase, tendo apresentado uma estimativa de emissões de GEE de 1.035 tCO_2eq.

Relativamente ao transporte de materiais, o EIA apresenta a estimativa de emissão de GEE, associada ao transporte de material lenhoso e transporte de material afeto a obra, de 0,23 tCO_2eq e 0,16 tCO_2eq, respetivamente.

Adicionalmente, foram apresentadas as estimativas de emissões de GEE associadas às deslocações da equipa necessárias para efeito das ações de desflorestação e plantação em 1,04 tCO_2 e 3,75 tCO_2, respetivamente.

Relativamente à produção de material a utilizar em obra, o EIA considera a aplicação de betão (4.038,57 t) nas casas de rega a construir, estimando-se a emissão de 2,08 tCO_2eq.

De acordo com o EIA, a implantação do projeto, e respetivas infraestruturas de apoio, implica a afetação de uma área de 191,85 ha de pinheiro-manso, e de 34,79 ha de pinheiro-bravo. De acordo com o EIA, a estimativa de perda de biomassa com as ações de desflorestação é de cerca de 18.145,06 tCO_2eq.

Fase de exploração

O projeto inclui a instalação de uma Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC), numa área total de 3,77 ha, que permitirá uma produção de energia elétrica de 5.648 MWh/ano, apresentando a respetiva estimativa de emissões evitadas de 3.614,3 tCO_2eq/ano.

O EIA identifica o impacte gerado pelo consumo de energia elétrica, associado sobretudo ao sistema de bombagem, apresentando uma estimativa de emissões de GEE em 100,15 tCO_2eq/ano.

De acordo com o EIA, a estimativa de emissões de GEE relativas ao consumo de combustíveis fósseis na operação de equipamentos agrícolas é de 247,80 tCO_2/ano. De igual forma, para as ações de plantação e colheita, o EIA considera o consumo de combustível fóssil no transporte da produção agrícola e deslocação de colaboradores, apresentando a estimativa de emissões em cerca de 24,69 tCO_2eq/ano e 14,33 tCO_2eq/ano, respetivamente.

Adicionalmente, o EIA estima as emissões de GEE originadas pela aplicação de fertilizantes/adubos em cerca de 97,08 tCO_2eq/ano com a fertilização orgânica e 107,45 tCO_2eq/ano com a fertilização inorgânica.

Para efeitos de compensação das ações de desflorestação em causa, o EIA faz referência à plantação de tangerina, numa área de 360,63 ha, e da plantação de pinheiro manso e pinheiro-bravo, numa área florestal total de 80,35 ha. De acordo com o EIA, estima-se que o contributo das ações de arborização para a compensação das emissões de GEE associadas às ações de desflorestação seja de 1.147,15 tCO_2eq/ano.

No que diz respeito à fase de desativação, o EIA considera os impactes associados ao consumo de combustível fóssil inerente à utilização de maquinaria e equipamento nesta fase, apresentando uma estimativa de emissões de GEE de 248,09 tCO_2. São igualmente apresentadas as emissões de GEE provenientes do transporte de colaboradores (2,5 tCO_2) e transporte de resíduos (0,4 tCO_2).

Vertente adaptação às alterações climáticas

No essencial, a vertente adaptação às alterações climáticas incide na identificação das vulnerabilidades do projeto face aos efeitos das mesmas, na fase de exploração, tendo em conta, em particular, os cenários climáticos disponíveis para Portugal e eventuais medidas de minimização e de prevenção. Aspetos importantes a considerar englobam a possibilidade de aumento da frequência e intensidade dos fenómenos extremos, devendo, assim, o EIA, abordar a avaliação destes fenómenos tendo em consideração não apenas os registos históricos, mas também o clima futuro para a identificação das vulnerabilidades do projeto no tempo de vida útil do mesmo.

Neste contexto, salienta-se que o Portal do Clima disponibiliza as anomalias de diversas variáveis climáticas (temperatura, precipitação, intensidade do vento, entre outras) face à normal de referência de 1971-2000, para os seguintes períodos 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100. Estes resultados são apresentados para Portugal continental com uma resolução aproximada de 11 km para cenários de emissões conducentes a forçamentos radiativos médio (RCP 4.5) e elevado (RCP 8.5). Propõe-se a seleção do período até 2100 para projetos de longo prazo ou o período mais representativo disponível face ao horizonte do projeto, atentos os cenários climáticos.

O EIA caracterizou o clima da área em causa, bem como a evolução prevista das principais variáveis climáticas para a região onde o projeto se insere, recorrendo à informação constante da "Estratégia Regional de Adaptação às Alterações Climáticas do Alentejo (ERAACA)", do "Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Sado e do Mira (RH6)", para além da informação constante do Portal do Clima. O EIA identificou, assim, o aumento da temperatura média anual, o aumento do número de dias de ondas de calor, o aumento do risco de incêndio, a diminuição da precipitação média anual e o aumento da ocorrência de fenómenos de precipitação extrema como as principais alterações ao nível do clima na área em causa.

De acordo com o EIA, e tendo por base a informação do "Mapa de Perigosidade de Incêndio Florestal do Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios de Alcácer do Sal (PMDFCI)", a área de estudo onde se desenvolve o projeto é classificada com uma perigosidade de incêndio maioritariamente média. No que se refere à área de implantação dos reservatórios, a mesma é classificada com uma perigosidade de incêndio muito alta.

De acordo com o EIA, o projeto não se insere em áreas com potencial risco significativo de inundações, de acordo com a informação do "Plano Diretor Municipal de Alcácer do Sal", que abrange a área onde se localiza o projeto.

Adicionalmente, considerando a informação constante do "Plano de Gestão da Região Hidrográfica (RH6)" da região em causa, verifica-se que o projeto em análise se insere em áreas com potencial risco de erosão hídrica reduzido.

Atento aos consumos de água previstos no projeto (2,28 hm^3/ano), considera-se da maior importância que o EIA tenha identificado as disponibilidades hídricas da região, considerando os cenários de alterações climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5, atendendo não só à tipologia do projeto em si, como ao seu contributo para agravar a pressão sobre os recursos hídricos, considerando o efeito cumulativo que possa advir da existência de projetos que acarretam elevados consumos de água, em funcionamento, na mesma região.

O EIA identifica como principais vulnerabilidades os riscos associados às temperaturas elevadas, a incêndios e a fenómenos de seca, com consequências para o projeto: Redução das disponibilidades hídricas; Danos materiais.

Medidas de Minimização

Concorda-se com as medidas apresentadas no EIA/Aditamento, propondo-se outras para minimizar o potencial de emissões de GEE e para atenuar a vulnerabilidade do projeto aos efeitos das alterações climáticas.

Conclusão

Ao nível das alterações climáticas, vertente mitigação, as principais afetações prendem-se com os impactes, sob a perspetiva de emissões de GEE na área florestal, designadamente a perda de biomassa resultante das ações de desflorestação ocorridas durante a fase de construção, bem como com o aumento de emissões de GEE associada às atividades de construção e ao consumo de energia elétrica inerente ao material circulante.

Entre os impactes identificados, destaca-se, pela sua relevância, o associado à desflorestação. De acordo com o EIA, a implantação do projeto implica a afetação de 191,85 ha de pinheiro-manso e 34,79 ha de pinheiro-bravo, estimando uma perda de biomassa correspondente a 18.145,06 tCO_2eq. Para efeitos de compensação da desflorestação, o EIA prevê a plantação de tangerineiras numa área de 360,63 ha, bem como a plantação de pinheiro-manso e pinheiro-bravo numa área florestal de 80,35 ha, estimando-se que estas ações contribuam para compensar as emissões associadas, num total de 1.147,15 tCO_2eq/ano.

Sobre a vertente adaptação às alterações climáticas, o EIA identifica as principais vulnerabilidades do projeto, destacando o risco associado às temperaturas elevadas, aos incêndios e os fenómenos de seca, dos quais podem resultar consequências, nomeadamente a redução de disponibilidades hídricas e a ocorrência de danos materiais.

Considera-se que o projeto apresenta impactes negativos relevantes no fator Alterações Climáticas, atendendo à tipologia em causa, neste caso a plantação de tangerineiras, em monocultura, numa área de aproximadamente 360,63 ha e a localização onde o mesmo está inserido, bem como às emissões identificadas, sendo por isso fundamental assegurar a implementação das suprarreferias medidas de mitigação e compensação propostas.

Assim, pondera-se a emissão de parecer favorável ao projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, condicionado, quer à avaliação efetuada no fator Recursos Hídricos, atendendo à relevância da temática dos Recursos Hídricos no contexto do projeto e da região em causa, e à sua interligação com o fator Clima e Alterações Climáticas, quer à implementação das medidas de minimização.

RECURSOS HÍDRICOS

Projeto

Localiza-se na freguesia da Comporta e na União das Freguesias de Alcácer do Sal (Santa Maria do Castelo e Santiago) e Santa Susana, concelho de Alcácer do Sal, no distrito de Setúbal. A área de implantação é de 2402,10 ha, e contempla: 360,63 ha de rega de tangerinas; 72,67 ha para caminhos, infraestruturas de apoio agrícola, áreas de servidão e reservatórios de água (combate a incêndios e rega); 1.650,13 ha de área florestal de produção; 366,12 ha para conservação e valorização ambiental.

O presente projeto, atualmente em fase de execução, tem como objetivo a instalação e exploração de um pomar de citrinos, especificamente tangerineiras da variedade Nadorcott. O compasso de plantação adotado será de 6 m entre linhas e 3 m entre plantas, resultando numa densidade de 556 árvores por hectare. O projeto será estruturado em 172 setores, com área média de 2,05 ha cada, totalizando aproximadamente 200.510 plantas.

Paralelamente, está prevista a diversificação da atividade agrícola e florestal, visando o aumento da rentabilidade através da produção complementar de cortiça e madeira. A produção de tangerinas destina-se maioritariamente ao mercado nacional, com ênfase no consumo em fresco. O período de colheita decorrerá entre janeiro e maio, sendo os frutos recolhidos no campo e posteriormente transportados por camião para o Centro de Distribuição de Alcácer do Sal, onde serão sujeitos a operações de calibragem, embalagem e expedição. Durante a plena campanha de colheita, estima-se um fluxo diário de cerca de 100 ton, correspondendo a 5 camiões por dia.

A primeira colheita, de carácter residual, está prevista para janeiro de 2028, cerca de 18 meses após a instalação do pomar. A plena capacidade produtiva deverá ser atingida entre o 5.º e o 6.º ano de exploração. No segundo ano, estima-se uma produtividade média de 2 ton/ha, patamar que se manterá até ao quarto ano. A partir do quinto ano, prevê-se o início da produção de cruzeiro, com um rendimento médio estimado de 60 ton/ha.

O projeto está estruturado em três fases operacionais: Instalação, que inclui a plantação das tangerineiras e a implementação das infraestruturas de apoio, a decorrer ao longo de 2026 (1.º e 2.º semestres); Exploração, prevista para iniciar em 2027, contemplando as atividades de produção, colheita e comercialização; Desativação, que corresponde ao encerramento do ciclo produtivo (25 a 30 anos). Apesar de prevista no EIA, não se antecipa a sua concretização a curto ou médio prazo, dada a natureza do empreendimento.

As principais ações e detalhes técnicos por fase podem ser sumariados do seguinte modo:

- Fase 1 - Infraestruturação e Plantação: preparação do solo (desmatação, arranque de cepos, limpeza manual, gradagem); plantação de 360,63 ha de tangerina, instalação de 16 captações de água subterrânea profundas (furos); construção de 5 reservatórios para armazenamento de água de rega, montagem de 5 casas de rega/bombagem e apoio agrícola; construção/beneficiação de caminhos e aceiros; instalação da rede elétrica e redes de adução/rega; colocação de 5 fossas sépticas estanques.
- Fase 2 - Exploração: operação agrícola com rega gota-a-gota e fertirrega controlada por plataforma de gestão; manutenção de áreas florestais (1650,13 ha) e zonas de conservação (366,12 ha), colheita anual (jan-mai) com transporte para o centro de distribuição em Alcácer do Sal; monitorização da qualidade da água e gestão fitossanitária com aplicação mínima de pesticidas; manutenção das infraestruturas hídricas e elétricas.
- Fase 3 - Desativação: encerramento ou reconversão da atividade agrícola; recuperação ambiental e requalificação do solo; eventual rearborização das áreas exploradas; desativação controlada dos sistemas de captação, bombagem e energia.

A área de 360,63 ha de tangerineiras requer um consumo anual estimado de aproximadamente 2,28 hm³ de água, a ser suprido exclusivamente por captações profundas de água subterrânea. O projeto prevê a perfuração de 16 furos profundos, com profundidades compreendidas entre 178 m e 288 m, equipados com bombas submersíveis com potência nominal de 60 cv e caudais variando entre 21 e 53 L/s. Em torno de cada furo será estabelecida uma zona de proteção com raio de 5 m, acompanhada da construção de casotas de alvenaria destinadas à proteção dos furos e das casotas de abrigos de quadros elétricos.

O armazenamento e a regularização do caudal captado serão assegurados por 5 reservatórios escavados e impermeabilizados com geomembrana de PEAD de 1,5 mm sobre manta de geotêxtil não tecido em poliéster de 200 g/m². A capacidade total de armazenamento é de 114.000 m³, correspondendo a 4-5 dias de rega. As capacidades individuais dos reservatórios são: R1 - 30 000 m³, R2 - 35 000 m³, R3 - 25 000 m³, R4 - 12 000 m³ e R5 - 12 000 m³. A área total ocupada pelos 5 reservatórios será de 9,60 ha, distribuída da seguinte forma: R1 - 2,25 ha, R2 - 1,50 ha, R3 - 2,25 ha, R4 - 1,35 ha e R5 - 2,25 ha. A decapagem dos primeiros 30 cm produzirá um volume de 28.800 m³, com volume de escavação de 82.078 m³ e volume de aterro de 272.037 m³, resultando num balanço positivo de 13.406 m³. Além da irrigação, os reservatórios funcionarão como reserva para combate a incêndios.

A adução da água captada para os reservatórios e destes para as casas de rega e áreas de apoio agrícola será efetuada através de condutas enterradas em PVC, com diâmetros entre 200 mm e 250 mm (classe 10 kg/cm²), perfazendo um total de 15.434 m de extensão. A rede de irrigação primária transporta a água dos reservatórios às subdivisões do pomar, enquanto a rede secundária realiza a distribuição intra-setor. As condutas da rede primária variam entre 75 mm e 400 mm (10 kg/cm²) e as da rede secundária entre 63 mm e 90 mm (6 kg/cm²). As condutas de limpeza associadas ao sistema de gotejamento, destinadas à purga dos laterais de rega, estendem-se por 37.275 m, com diâmetro de 63 mm (6 kg/cm²).

As tubagens de adução e da rede de irrigação serão instaladas em valas com profundidades entre 1,00 m e 1,20 m e largura de 0,80 m, ao longo de toda a propriedade. O sistema de irrigação é baseado em gotejamento com gotejadores autocompensantes, distribuídos em duas linhas de tubagem de polietileno de 16 mm de diâmetro, operando a 3,5 bar de pressão, com débito de 1,6 L/h e espaçamento entre gotejadores de 0,5 m.

As 5 casas de rega/bombagem, associadas a cada reservatório, incluem grupos de bombagem para irrigação por gotejamento, fertirrigação e filtração, bacias para preparação de caldas e lavagem de pulverizadores e outras máquinas, com condução para bacias de evaporação e fossas sépticas estanques.

As águas residuais dos WC amovíveis serão recolhidas por empresa contratada para destino adequado, bem como as águas residuais geradas nas casas de rega/bombagem serão armazenadas em fossas estanques.

Os lixiviados resultantes da preparação de caldas e da lavagem de pulverizadores contendo produtos químicos ou fitofármacos serão armazenados em tanque com sistema Heliosec. Este sistema consiste numa bacia de retenção que recebe os lixiviados e os conduz a uma bacia de evaporação natural, permitindo a secagem completa do líquido e a geração de resíduo sólido, a ser encaminhado por operador licenciado ou empresa fornecedora da solução.

Situação de referência

Em termos gerais, considera-se que a caracterização da situação ambiental de referência apresenta uma abordagem sistemática, detalhada, clara e homogénea. A metodologia adotada para a análise e tratamento neste fator é adequada a projetos desta natureza, apoiando-se em dados hidrométricos, inventários de captações e informações bibliográficas consideradas pertinentes e atualizadas, permitindo a avaliação do regime de exploração.

O projeto em análise situa-se no âmbito territorial de jurisdição da APA/ARH do Alentejo, integrando a Região Hidrográfica 6 (Sado e Mira), e desenvolve-se nas bacias hidrográficas correspondentes às três massas de água.

Designação	Código	Categoria	Classificação do estado/Estado global (Parâmetros responsáveis)
Sado WB5	PT06SAD1219	Águas de transição	Inferior a bom (Macroinvertebrados bentónicos)
Afluente do Rio Sado	PT06SAD1237	Rio	Inferior a bom (Macrófitos; Macroinvertebrados bentónicos; Azoto total; Nitratos)
Afluente do Rio Sado	PT06SAD1238	Rio	Inferior a bom (Macrófitos; Macroinvertebrados bentónicos; Zinco dissolvido)

Quadro 3 - Massas de água superficial que interferem com a área do projeto

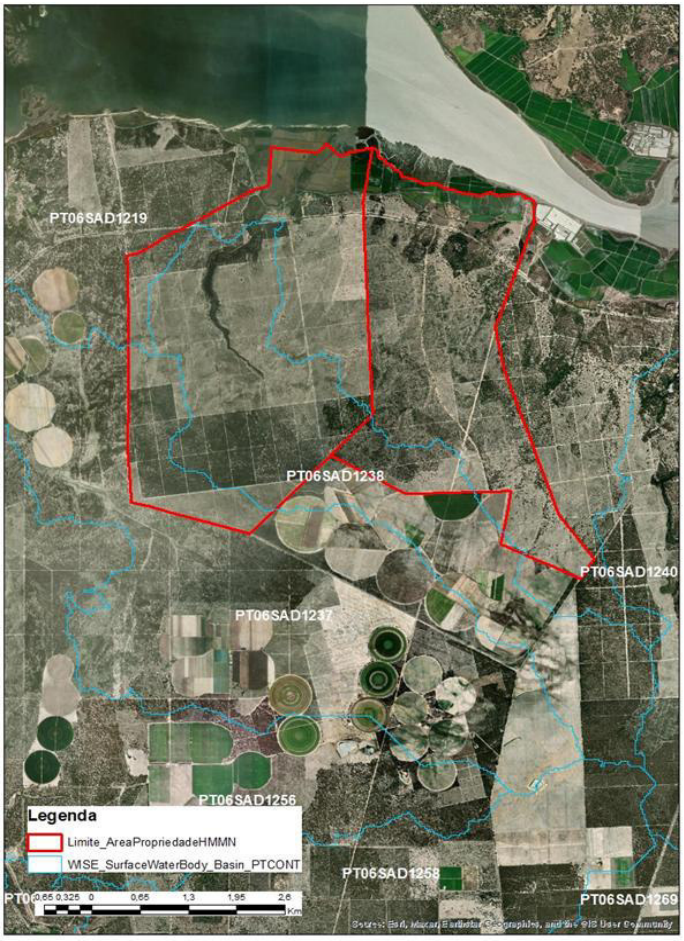


Figura 10 - Localização das massas de água superficial que intercetam a área do projeto

Os cursos de água que atravessam a área do projeto apresentam um regime hidrológico intermitente e irregular, caracterizado como torrencial, com rede hidrográfica pouco desenvolvida, constituindo afluentes do rio Sado.

Do ponto de vista hidrogeológico, a área de implantação integra o Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda, correspondendo à massa de água subterrânea PT05T3, classificada com estado global medíocre.

Esta classificação resulta da combinação de um estado químico “Medíocre” e um estado quantitativo considerado “Bom”, mas em situação de risco, conforme definido no Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste - PGRH 3.º Ciclo, aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros (RCM) nº 62/2024, de 3 de abril. A área integra uma zona destinada à captação de água para consumo humano, implicando a adoção de medidas de proteção e gestão sustentável do recurso.

Esta massa de água apresenta características de sistema aquífero poroso, estendendo-se por duas regiões hidrográficas (Tejo e Sado), com maior representatividade na região hidrográfica do Tejo. A constituição geológica do sistema incluye formações do Pliocénico, Arenitos da Ota e a Série Calco-Gresosa Marinha do Miocénico. Hidraulicamente, trata-se de um sistema multiaquífero, apresentando condições livres, confinadas ou semiconfinadas, sendo as variações laterais e verticais de fácies determinantes de mudanças significativas nas propriedades hidrogeológicas.

Em termos de piezometria e direções de fluxo, o escoamento subterrâneo segue preferencialmente em direção aos rios Tejo e Sado e, ao longo do sistema aquífero, até ao Oceano Atlântico. O fluxo natural possui uma componente vertical entre as diferentes unidades aquíferas, subordinada à circulação horizontal dominante, com orientação geral em direção ao estuário do Tejo, ao estuário do Sado e, por extensão, ao Oceano Atlântico.

Quanto à vulnerabilidade à contaminação, os índices disponíveis indicam valores contrastantes: o índice EPPNA revela "Elevada vulnerabilidade" na zona, enquanto o índice DRASTIC aponta para uma "Vulnerabilidade intermédia", sugerindo a necessidade de monitorização contínua e gestão preventiva do aquífero.

Avaliação de impactes

Em termos gerais, considera-se que a identificação, caracterização e avaliação dos impactes apresenta uma abordagem sistemática, clara e coerente relativamente ao fator "Recursos Hídricos".

Tendo em conta as especificidades do projeto, conclui-se que os principais impactes incidirão sobre os recursos subterrâneos, estando estes associados, predominantemente, à extração de água proposta e ao risco potencial de contaminação por nutrientes e produtos fitofarmacêuticos. Adicionalmente, poderão ocorrer impactes sobre os recursos hídricos superficiais, com especial relevância para a afluência, e a sua qualidade físico química e biológica.

Recursos Hídricos Superficiais

Sobre a fase de construção, a desmatação e a remoção parcial do coberto vegetal, a realizar em uma área total de 433,30 ha, englobando 360,63 ha de plantação e 72,67 ha correspondentes à implantação das infraestruturas, assim como a limpeza do terreno, poderão induzir alterações na rede de drenagem natural da área. Trata-se dum impacte negativo, direto, temporário, imediato, reversível, provável, de magnitude reduzida pouco significativo, e local.

É importante salientar que o desnudamento temporário do solo, aliado à predominância de fração arenosa nos horizontes superficiais, pode, em condições de elevada pluviosidade, favorecer a ocorrência de processos erosivos e o transporte de sedimentos para os cursos de água existentes, resultando no aumento da carga sólida transportada e potencializando o assoreamento a jusante. Contudo, deve-se destacar que a combinação de elevada permeabilidade do solo com baixo declive topográfico, características predominantes na área de implantação do projeto, tende a limitar a ocorrência de erosão significativa do solo e, consequentemente, a transferência de sedimentos por escoamento superficial. Considera-se, pois, que a magnitude destes impactes é reduzida, sendo pouco significativos, e alvo de minimização.

A correção do solo, a ser executada ao longo do camalhão imediatamente após a remoção do coberto vegetal, permitirá a mitigação dos processos erosivos e a diminuição do transporte de sedimentos para os cursos de água, reduzindo o assoreamento e conferindo um efeito positivo na contenção da erosão do solo. Trata-se de um impacte positivo, direto, permanente, de médio prazo, de magnitude moderada, reversível, provável e local.

Embora as linhas de água presentes na área do projeto agrícola correspondam exclusivamente a cursos de escorrência preferencial do terreno, nem sempre aparentes, a sua interferência durante a fase de construção representa um impacto potencial adicional. Considera-se que será um impacte negativo, direto, temporário, imediato, de magnitude moderada e reversível.

A operação de maquinaria agrícola e de outros equipamentos durante a fase de construção poderá ocasionar poluição localizada por hidrocarbonetos, óleos lubrificantes e gorduras. O impacte é negativo, indireto, temporário, imediato, de magnitude reduzida, reversível, provável e local.

A escavação de valas das condutas de adução, redes elétricas ou tanques de lamas associados às captações de água subterrânea poderá, em períodos de elevada pluviosidade, causar turvação localizada da água nos cursos de escoamento. O impacte é negativo, direto, temporário, imediato, de magnitude reduzida, reversível e provável.

Sobre a fase de exploração, o impacte associado à impermeabilização do solo, resultante da implantação dos edifícios e do reservatório, traduz-se na alteração das condições naturais de escoamento superficial. Deste modo, considera-se que são impactes que se mantêm durante a fase de exploração, sendo, como tal, negativo, direto, certo, permanente, reversível, de magnitude reduzida e local.

No que se refere à potencial alteração da qualidade da água superficial, esta poderá ser influenciada pelo incremento na utilização de adubos, através da fertirrigação, e pela aplicação de pesticidas e outros produtos fitofarmacêuticos. O aumento da concentração de nutrientes nas águas superficiais pode conduzir à diminuição dos níveis de oxigénio dissolvido, condição suscetível de provocar alterações no estado ecológico da massa de água a jusante. Este é um impacte negativo, direto, pouco provável, de magnitude reduzida e local.

Recursos Hídricos Subterrâneos

Sobre a fase de construção, a circulação de maquinaria agrícola poderá provocar compactação do solo, reduzindo a capacidade de infiltração e favorecendo o escoamento superficial. Contudo, a elevada permeabilidade do terreno natural não propicia a formação de alagamentos significativos nem de escoamentos superficiais expressivos. Este impacte é classificado como negativo, indireto, temporário, imediato, de baixa magnitude, reversível, pouco provável e de carácter local.

As escavações pontuais, com profundidade máxima de 1,50 m poderão, pontualmente, atingir o nível freático. No entanto, considerando o carácter localizado e temporário destas intervenções, bem como a reduzida dimensão das fundações, valas e tanques, não se prevê a necessidade de rebaixamento do nível freático. Caso ocorra este tipo de interferência, os impactes restringir-se-ão aos níveis freáticos locais e superficiais, sem afetação dos usos da água. Nestas circunstâncias, a eventual oscilação do nível freático no aquífero representa um impacte negativo, direto, mas pouco provável, temporário, local, de reduzida magnitude e pouco significativo.

Assim, na fase de construção, os principais impactes sobre os recursos hídricos, tanto superficiais quanto subterrâneos, estarão relacionados com a remoção do coberto vegetal, a preparação do terreno para a implantação dos pomares, a execução das obras de instalação dos sistemas de rega, a construção das 16 captações de água subterrânea previstas, eventuais intervenções em linhas de água e a ocorrência de poluição localizada por hidrocarbonetos, óleos e gorduras resultante da operação de maquinaria. Trata-se de um impacte negativo, direto, certo, permanente, reversível, de magnitude reduzida e local.

Relativamente à fase de exploração, os principais impactes estão relacionados com o consumo de água para irrigação e com a potencial contaminação por nutrientes, pesticidas e produtos fitofarmacêuticos.

A irrigação será realizada através de um sistema de rega gota-a-gota, equipado com gotejadores de baixo débito (1,6 L/h), de modo a otimizar a eficiência no uso de água e energia. Para atender às necessidades hídricas do projeto, prevê-se a construção de 16 captações profundas, com caudais individuais variando entre 76 m³/h (21 L/s) e 190 m³/h (53 L/s), distribuídas ao longo da propriedade (Figura 11 com a localização dos piezómetros).

Relativamente ao Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda, a recarga anual é estimada em 820,86 hm³, enquanto os consumos anuais registados são de 367,05 hm³, correspondendo a uma taxa de exploração aproximada de 56% (informação retirada do Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste - PGRH 3.º Ciclo, aprovado pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 62/2024, de 3 de abril).

No âmbito deste 3.º ciclo de planeamento, e considerando a redução da precipitação observada nos últimos 20 anos, foi adotada a diminuição do limiar de exploração sustentável dos recursos subterrâneos, de 90% para 80% da recarga média anual a longo prazo, com o objetivo de proteger e conservar as águas subterrâneas face à redução das disponibilidades hídricas e ao aumento das extrações sobre as massas de água.

Para a área do projeto (24,021 km²), a disponibilidade hídrica considerada é aquela atribuída na utilização n.º PIP065603.2024.RH6, válida até 02/12/2025. Esta atribuição define uma disponibilidade hídrica por unidade de área de 0,0955 hm³/km²/ano, correspondendo a uma disponibilidade potencial total para o projeto de 2,294 hm³/ano.

O EIA assume como dotação de referência 6 310 m³/ha/ano, traduzindo-se em necessidades anuais totais estimadas de água para rega e sistema antigeada de 2.282.062 m³. Deste modo, considera-se garantida a sustentabilidade dos consumos previstos para a rega, utilizando exclusivamente os recursos locais do aquífero.

Adicionalmente, importa salientar que nas imediações da área do projeto existem outros empreendimentos agrícolas e captações destinadas a abastecimento público e industrial, cujos consumos estimados de água subterrânea totalizam cerca de 18,09 hm³/ano.

Projeto/Utilizador	Local	Área total (ha)	Área de Intervenção (ha)	Consumo (hm³)
Projeto Agrícola HM/Projeto Agrícola BVHL Invest	Herdade do Monte Novo do Sul	649	528,5	2,79
Projeto Hortícola da Herdade da Comporta	Herdade da Comporta	982	905	2,83
Projeto Agrícola HTN	Herdade das Texugueiras Norte	282,25	264	0,57
Projeto Agrícola HTS	Herdade das Texugueiras Sul	188,03	148	0,18
Exploração Agropecuária da Herdade da Asseiceira	Herdade da Asseiceira	310,56		0,30
Projeto Agroflorestal CarSol Fruits Portugal	Herdade de Montalvo	640,31	144,25	0,90
Projeto Agroflorestal LSM	Herdade de Montalvo Sul	209	103,2	0,52
Sutol - Indústrias Alimentares, Lda.	Herdade do Moinho da Ordem			3,29
Projeto Agroflorestal da Herdade do Vale Gordo	Herdade de Vale Gordo	182,36	90,06	1,00
Herdade do Mar	Herdade do Mar	357,88	212,45	1,53
Projeto Agroflorestal da Herdade da Batalha	Herdade da Batalha	2.664,25	615,2	3,18
AgdA - Águas Públicas do Alentejo, S.A.	Mata Nacional de Valverde			1,00

Quadro 4 - Consumos impactantes na área vizinha do projeto



Figura 11 - Potencial localização das captações de água subterrânea

Considerando a fração do aquífero inserida na área de jurisdição da APA/ARH do Alentejo, nos concelhos de Alcácer do Sal e Grândola, as disponibilidades hídricas anuais são estimadas em 125,1 hm³, conforme definido no PGRH Tejo e Ribeiras do Oeste, relativo ao 3.º Ciclo de Planeamento (2022-2027). Os consumos anuais reportados até dezembro de 2022 totalizam 52,03 hm³, representando 41,6% das disponibilidades nesta área.

A implementação do projeto implicará acréscimo no consumo de água subterrânea equivalente a 1,82% das disponibilidades existentes.

Considera-se que, na fase de exploração, o impacte associado ao consumo de água para irrigação, nomeadamente em termos de variação da superfície piezométrica da massa de água subterrânea, será negativo, direto, permanente, de médio a longo prazo, de magnitude elevada, muito significativo, certo, reversível e de alcance local a regional.

No que respeita à qualidade da água subterrânea, esta poderá ser afetada pelo incremento de nutrientes e pelo uso de pesticidas e fitofarmacêuticos. A lixiviação destes compostos para os lençóis freáticos pode alterar o estado químico da água, sobretudo pelo aumento da concentração de nitratos e de resíduos de pesticidas. Assim, considera-se que, na fase de exploração, o impacte provocado por contaminação por nutrientes, pesticidas e fitofármacos, representa um impacte negativo, direto, certo, permanente, reversível, com magnitude moderada, minimizável e local.

Refira-se, ainda, que o impacte associado à diminuição da recarga direta, devido à presença de áreas impermeabilizadas, tais como os reservatórios, casas de apoio agrícola, casa de rega, e área de carregamento de camiões, com uma área de ocupação de 72,67 ha, é negativo, direto, certo, permanente, reversível, de magnitude reduzida a moderada, pouco significativo a significativo e local.

Relativamente à fase de desativação, o promotor não equaciona a desativação, embora preveja, no caso de acontecer, a cessação das práticas agrícolas com remoção/demolição das infraestruturas e edificado de apoio ao projeto e selagem das captações de água subterrânea.

São previsíveis impactes negativos de natureza semelhante aos observados na fase de construção, com potencial interferência pontual nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. A cessação das práticas agrícolas de regadio determinará, localmente, a elevação da superfície piezométrica da massa de água subterrânea, correspondendo inversamente ao rebaixamento induzido pela exploração agroflorestal, com efeitos reduzidos à escala regional.

No que se refere à qualidade da água, a interrupção do aporte de nutrientes, pesticidas e produtos fitofarmacêuticos para as massas de água superficiais e subterrâneas resultará numa melhoria gradual dos parâmetros químicos e do estado ecológico das mesmas.

Conclusão

De acordo com o indicado no último parecer setorial, emitido após o período de consulta pública, considera-se que:

1. Elevada sensibilidade da área de implantação do projeto, devido à sua localização sobre a massa de água subterrânea Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda (P05T3). Esta massa de água constitui a única fonte de abastecimento para a uma população muito elevada, da ordem de 1,5 milhões de habitantes, incluindo a população local junto à área do projeto, apresentando riscos significativos de impactes quantitativos e químicos irreversíveis;

2. Os projetos que provoquem rebaixamento dos níveis freáticos das massas de água subterrâneas exigem a verificação da necessidade de aplicação dos artigos 51.º e 52.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro, bem como a demonstração do cumprimento das condições ali previstas, exercício que se considere não ter sido alcançado no âmbito do presente procedimento de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA);

3. A massa de água da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda permanece em situação crítica desde julho de 2022 e assim se mantem até setembro de 2025, tal como pode ser consultado nos relatórios mensais com a monitorização agrometeorológica e hidrológica disponíveis no site da APA através do link https://apambiente.pt/agua/relatorios-demonitorizacao-agrometeorologica-e-hidrologica:

4. O EIA não apresenta avaliação aprofundada dos impactes cumulativos sobre a massa de água subterrânea;

5. Ausência de avaliação de outra origem de água alternativa;

6. Esta massa de água, mesmo que deixe de estar em situação crítica, exige uma análise muito prudente da autorização para a execução de novas captações e, consequentemente, dos volumes a serem concedidos, uma vez que o balanço hídrico (ver PGRH do 3.º ciclo da RH5A) permite antever uma situação de défice, pelo que qualquer ação que provoque alteração do estado quantitativo da massa de água pode agravar esta situação, não dando cumprimento ao disposto no artigo 47.º da Lei da Água. Acresce que com os impactes esperados pelos efeitos das alterações climáticas para esta região poderá inclusive vir a ser necessário fazer uma revisão dos títulos já concedidos para além de se justificar desde já uma fiscalização mais ativa para reduzir as extrações ilegais e necessidade de reforço e automatização da rede de monitorização piezométrica.

7. De acordo com a apreciação que nesta fase é possível realizar, com os elementos disponibilizados pelo promotor, existem alterações significativas e permanentes na massa de água subterrâneas afetada, que implicam a necessidade de aplicação da derrogação do 4(7). As medidas de minimização definidas não permitem afastar esta necessidade. Não é possível encontrar justificações para a aplicação do disposto na alínea c) do n.º 5 do artigo 51.º da Lei da Água, que refere “que as razões de tais modificações ou alterações sejam de superior interesse público ou os benefícios para o ambiente e para a sociedade decorrentes da realização dos objetivos definidos sejam superados pelos benefícios das novas modificações ou alterações para a saúde humana, para a manutenção da segurança humana ou para o desenvolvimento sustentável”, atendendo aos impactes negativos sobre uma massa de água que se encontra em risco de não atingir os objetivos ambientais, conforme o PGRH do 3.º ciclo da RH5A, sensível e estratégica para o abastecimento público. O mesmo se passa com o disposto na alínea d) do n.º 5 do artigo 51.º da Lei da Água;

8. Importa, também, referir o resultado das consultas promovidas no âmbito do presente procedimento de AIA, em que a ampla participação pública registada revelou uma forte resistência da população, dos agricultores e dos órgãos de soberania local à implementação do projeto, expressando preocupações ao nível da potencial afetação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos;

9. A maioria das preocupações manifestadas na consulta pública coincide com as principais temáticas abordadas e ponderadas na avaliação e, consequentemente, concorreram para o sentido da decisão;

10. O sentido desta decisão também se fundamenta nas determinações resultantes da 10.ª reunião, e subsequentes, da Comissão Permanente de Prevenção, Monitorização e Acompanhamento dos Efeitos da Seca, que impõem a suspensão, por tempo indeterminado, da atribuição de novos títulos de captações de água, de uso não prioritário, nas massas de água subterrâneas identificadas em situação crítica no Relatório de Monitorização Agrometeorológica e Hidrológica, em vigor, até que haja recuperação das massas de água; importando também, assegurar os títulos já concedidos, presentemente e no futuro;

11. As decisões da Comissão Permanente de Prevenção, Monitorização e Acompanhamento dos Efeitos da Seca (criada pela RCM n.º 80/2017, de 7 de junho), têm por base o disposto no Plano de Prevenção, Monitorização e Contingência para Situações de Seca, sendo que a aplicação de medidas restritivas, quer aos direitos anteriormente atribuídos na utilização dos recursos hídricos, quer aos condicionalismos para licenciar novas captações até à recuperação da(s) massa(s) de água em causa, encontram suporte legal nas alíneas n) e o) do n.º 2 do artigo 8.º e n.º 2 do artigo 41.º da Lei da Água, bem como, no artigo 28.º do Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio, e ainda no disposto no PGRH RH5A, nos termos da alínea b) do n.º 1 do artigo 63.º da Lei n.º 58/2005;

12. Conforme estabelecido na alínea a) do n.º 2 do artigo 47.º da Lei da Água e no artigo 10.º do Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio, ambos na sua redação atual, a atribuição de um título de utilização dos recursos hídricos (TURH) para captação de água subterrânea deve ter sempre por base a avaliação dos recursos hídricos disponíveis

na respetiva massa de água, à data do pedido, considerando, ainda, a sua evolução histórica em termos de estado quantitativo, os volumes já atribuídos e a garantia de resiliência que permita dar resposta quando ocorrem anos secos. Devem, ainda, considerar-se os usos prioritários existentes (cfr. definido no artigo 64.º da Lei da Água), o abastecimento público, assegurando uma capacidade de resposta a este uso no mínimo por um ano;

13. A APA, I.P., enquanto Autoridade Nacional da Água, deve promover uma utilização sustentável de água, numa proteção a longo prazo dos recursos hídricos disponíveis, nos termos previstos na alínea b) do n.º 1 do artigo 1.º, nos artigos 7.º e 8.º e na alínea b) do n.º 1 do artigo 63.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro (Lei da Água), com as posteriores alterações, e de acordo com o Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Sado e Mira (PGRH do 3.º ciclo da RH5A), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros (RCM) n.º 52/2016, de 20 de setembro;

Face ao exposto, nos termos do Regime Jurídico de Avaliação de Impacto Ambiental (RJAIA), deve ter-se em conta que o fim último do procedimento de AIA é o de auxiliar a adoção de decisões administrativas baseadas em conhecimento científico e numa compreensão dos diversos cenários possíveis e prováveis, que sejam ambientalmente sustentáveis, considerando o relatório da consulta pública e os restantes elementos instrutórios, pelo que considera-se, à luz do princípio da precaução e prevenção, previsto no artigo 89.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro (Lei da Água), nesta fase do processo, apenas uma decisão desfavorável Sobre à componente agrícola do projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, assegura a devida proteção do ambiente, da água e das populações, nos termos do artigo 18.˚ n.º 1 do RJAIA.

ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Plano Regional de Ordenamento do Território do Alentejo (PROTA)

O Projeto pode inserir-se nas Opções Estratégicas de Base Territorial (OEBT) do PROTA, que reconhecem a importância estratégica das atividades agrícolas para o desenvolvimento da região, nomeadamente *"Desenvolver o modelo de produção agroflorestal e agroindustrial com base nas fileiras estratégicas regionais, garantindo a utilização racional dos recursos disponíveis, promovendo a diversificação e valorização das produções e tornando operativa a multifuncionalidade dos sistemas agrossilvopastoris e do património agrícola e rural".*

Plano Diretor Municipal (PDM) de Alcácer do Sal

O enquadramento no PDM foi realizado sobre a revisão publicada no Aviso n.º 13020/2017 de 30 de outubro, na 4.ª correção de erros materiais, publicada no Aviso n.º 15461/2022 de 5 de agosto de 2022.

Extrato da planta Reserva Ecológica Nacional (REN)

A área de estudo (Herdades de Murta e de Monte Novo) encontra-se marcada pela presença da REN, nomeadamente curso de água, margens e cursos de água, na zona denominada Açude de Murta.

A componente agrícola não se encontra inserida em área de REN.

Extrato da planta Reserva Agrícola Nacional (RAN)

A área de estudo encontra-se compreendida em simultâneo em área hidroagrícola e em RAN, numa extensa área junto à extrema norte. Para além disso, existem ainda duas áreas de apenas RAN junto à estrada regional ER253.

A componente agrícola não se encontra inserida em área de RAN.

Extrato da planta de Ordenamento

A área de estudo encontra-se totalmente inserida em solo rústico, nomeadamente espaços florestais - espaços florestais de produção (artigo 55º e 56º), espaços agrícolas - espaços agrícolas de produção e outros espaços agrícolas e espaços naturais (artigo 49º a 52º) - espaços naturais e paisagísticos de proteção parcial I (artigo 60º, 62º e 64º). Esta área encontra-se ainda marcada pela presença de cursos e linhas de água, e leitos e planos de água, tal como marcada por áreas de intervenção - Planos Especiais de Ordenamento do Território (PEOT). Para além disso, encontra-se também marcada pela presença de infraestruturas de transformação e de transporte de energia elétrica, junto ao limite norte e contígua a rede rodoviária, estrada regional sob jurisdição das IP.

A componente agrícola encontra-se totalmente inserida em espaços florestais - espaços florestais de produção.

Extrato da planta de Ordenamento - Outros Limites

A área de estudo encontra-se marcada pela presença de linhas e planos de água, sendo atravessada pela rede rodoviária e em área de conflito acústico Lden > 65, tal como inserida parcialmente, junto à extrema norte em PEOT - Planos de ordenamento de áreas protegidas (POAP) - Reserva Natural do Estuário do Sado.

A componente agrícola não se encontra inserida em condicionantes da planta de Ordenamento - Outros Limites.

Extrato da planta de Ordenamento - Estrutura Ecológica Municipal

A área de estudo encontra-se marcada pela presença de cursos e linhas de água, leitos e planos de água e atravessada pela rede rodoviária.

Para além disso, encontra-se parcialmente inserida no PEOT - PORNES e marcada por áreas nucleares - corredores ecológicos do Plano Regional de Ordenamento Florestal do Alentejo (PROFAL), Habitats prioritários da Rede Natura 2000 incluído os que surgem em consociação e Açude da Murta e de Vale Coelheiros, tal como por áreas de conetividade - corredores ecológicos das linhas de água. Na extrema norte é de evidenciar a presença de um sítio arqueológico - 116 Monte Novo do Sul.

A componente agrícola encontra-se inserida totalmente em Habitats da Rede Natura 2000.

Extrato da planta de Condicionantes

A área de estudo encontra-se marcada pela presença de recursos hídricos e florestais, com extensa área percorrida por incêndios. Encontra-se ainda inserida em Recursos Ecológicos - Sítio de importância comunitária, e parcialmente inserida em REN, reserva natural, zona de proteção especial de aves. Encontra-se também marcada pela presença da rede elétrica, tal como pela rede rodoviária (próximo do limite norte), nomeadamente a estrada regional ER253 e por zonas de servidão *non aedificandi* da RRN. A área de estudo apresenta ainda 2 Marcos geodésicos e respetivas zonas de proteção, nomeadamente o marco denominado por Murta e Olhos de Água, para além disso, a área alvo de analise encontra-se marcada pelo atravessamento do gasoduto/oleoduto.

A componente agrícola encontra-se totalmente inserida em Sítio de importância comunitária.

Extrato da planta de Condicionantes - Outros recursos

A área de estudo encontra-se parcialmente inserida em PEOT - PORNES e marcada pela presença de recursos agrícolas, nomeadamente aproveitamentos hidroagrícolas (Vale do Sado - AHVS), tal como, por infraestruturas principais dos aproveitamentos hidroagrícolas (condutas, canais e outras infraestruturas lineares, com faixas de proteção de 5 m para cada lado das estremas dos canais ou do eixo das condutas ou outras infraestruturas) e parcialmente na RAN. Para além disso, encontra-se marcada pela presença de cursos e linhas de água.

A componente agrícola não se encontra inserida em condicionantes da planta de Condicionantes - Outros recursos.

Extrato da planta Áreas Protegidas, Rede Natura e Sítios RAMSAR

A área de estudo encontra-se totalmente inserida em Área Protegida, em Sítios RAMSAR - Zonas húmidas de importância internacional, em Sítio de Importância Comunitária e em Zona de proteção especial.

A componente agrícola encontra-se inserida totalmente em Sítio de Importância Comunitária.

Plano Municipal de Defesa Contra Incêndios (PMDFCI)

A área de estudo apresenta uma perigosidade maioritariamente “Média” e pontualmente “Alta” e “Muito Alta”, tal como uma extensa área de perigosidade “Muito Baixa” na extrema norte. No que se refere ao Risco de Incêndio, apresenta um risco maioritariamente “Moderado” e pontualmente “Muito Elevado” e “Máximo”, tal como extensas áreas de “Risco elevado”.

A componente agrícola encontra-se marcada por áreas de perigosidade maioritariamente “Média”. Sobre o risco de incêndio, encontra-se marcada por “Risco Elevado” e pontualmente “Muito elevado” e “Máximo”.

O PMDFCI em vigor foi publicado pelo Edital n.º 818/2022, de 6 de junho de 2022. Face a esta situação existem discrepâncias com o PDM, essencialmente ao nível da nomenclatura de perigosidade e risco de incêndio, ultrapassada com a 2.ª Alteração por Adaptação do PDM de Alcácer do Sal, publicada em Diária da República - Declaração n.º 128/2025, de 2 de setembro de 2025.

Conclusão

Planta de Ordenamento

Sobre a sobreposição com “Espaços Florestais de Produção”, de acordo com o artigo 26º do Regulamento do PDM - Condições gerais de viabilização dos usos do solo - a componente agrícola tem enquadramento no nº 2, sendo o uso dominante florestal compatível na alteração para o uso complementar agrícola. E terá enquadramento no nº 4, se a alteração do uso dominante cumprir “(…) *só pode ocorrer quando fundamentadamente se considerar que daí não decorrem riscos para a segurança de pessoas e bens, nem prejuízos ou inconvenientes de ordem funcional, ambiental, paisagística ou urbanística, que não possam ser evitados ou eficazmente minimizados. (...)"*.

Sobre a sobreposição com “Habitats prioritários da Rede Natura 2000”, de acordo com o artigo 40º do Regulamento do PDM - Alterações do uso do solo nas áreas classificadas - a componente agrícola terá enquadramento se a alteração do uso do solo cumprir *“Nas áreas classificadas nos termos do Regime Jurídico da Conservação da Natureza e da Biodiversidade, estão sujeitas a autorização do ICNF, as alterações do uso do solo, incluindo as reconversões culturais, que impliquem alteração da utilização e as alterações culturais de cobertura diferentes. (...)"*.

Planta de Condicionantes

Sobre a sobreposição com “Rede Natura 2000”, a componente agrícola terá enquadramento se, no presente procedimento de AIA, obter um parecer favorável ou favorável condicionada do ICNF.

Sobre as Servidões e Restrições de Utilidade Pública, ocorrem na área do Projeto "Rede de Gás" (Gasoduto Oleoduto Sines-Setúbal),"Rede Elétrica" (Linha Aérea de Alta Tensão) e "Rede Rodoviária Nacional" (EN 253), pelo que foram solicitados os respetivos Pareceres Externos às respetivas entidades.

2.4 PARECERES EXTERNOS À CA

Foram solicitados Pareceres Esternos às entidades: Associação de Beneficiários do Vale do Sado; Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural; Águas Públicas do Alentejo SA; Infraestruturas de Portugal SA; REN Gasodutos SA; E-REDES Distribuição; Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP.

Associação de Beneficiários do Vale do Sado (destaca-se)

"Á Associação de Beneficiários do Vale do Sado, ao abrigo do Contrato de Concessão da Gestão do Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Sado, cabe-lhe, entre outras, a obrigação de assegurar a gestão racional da água de acordo com as normas estabelecidas e as disponibilidades hídricas, bem como garantir a igualdade e transparência no acesso e na utilização da água e das infraestruturas do Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Sado (conforme o disposto na Cláusula VIII, do referido Contrato de Concessão).

No entanto, na prossecução da sua missão e no cumprimento das suas obrigações, legais e contratuais, a ABVS não pode deixar de estar atenta à utilização dos recursos hídricos quer na área geográfica sob sua jurisdição, quer nas restantes áreas. E desta forma, face aos conhecidos e progressivamente agravados problemas que se têm sentido nos últimos anos no aquífero da margem esquerda do Sado, de onde se tem retirado mais água do que aquela que a natureza tem conseguido repor, a Associação de Beneficiários do Vale do Sado manifesta a sua profunda preocupação com o impacto significativo de projetos desta natureza e dimensão no abastecimento de água à população do concelho de Alcácer do Sal e na agricultura da região (onde não pode ser esquecida a importância ambiental da cultura do arroz no Estuário do Sado). Assim, projetos desta natureza não contribuem para o uso eficiente da água e agravam, de forma irreversível, a enorme pressão existente sobre um recurso já escasso, como a água, pois dependem de volumes de água que já não existem."

E anexa o Despacho n.º 2/2023, de 22/05/2023, da Ministra da Agricultura e da Alimentação. *"Considerando o aumento da frequência dos fenómenos de escassez hídrica, importa promover uma gestão eficiente do recurso água, através da adoção de medidas de mitigação e de adaptação que contribuam para o aumento da resiliência dos sistemas agrícolas e garantam o abastecimento, presente e futuro, dos sistemas de regadio. Nesse sentido, torna-se necessário assegurar uma gestão mais racional das áreas ocupadas por culturas permanentes, regadas a título precário, nos aproveitamentos hidroagrícolas e estabelecer medidas que contribuam para uma efetiva poupança no consumo de água de rega, designadamente através do aumento da sua eficiência. Nestes termos, determino o seguinte: 1 - À Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (DGADR) para diligenciar no sentido de não serem concedidas autorizações para o fornecimento de água, a título precário, para: a) Novas instalações de culturas permanentes; b) Reconversão das culturas permanentes existentes, por outras culturas permanentes de maior exigência hídrica; c) Reconversão das culturas permanentes existentes, por outras culturas permanentes de igual ou menor exigência hídrica sem sistema de rega eficiente comprovadamente instalado e na ausência de disponibilidade hídrica. 2 - À Autoridade de Gestão do PEPAC Portugal no continente (PEPAContinente) para excluir dos critérios de admissibilidade aos concursos das medidas de apoio ao investimento, a instalação ou reconversão de culturas permanentes regadas a título precário nos aproveitamentos hidroagrícolas. 3 - A verificação da eficiência do sistema de rega é efetuada nos termos definidos pela DGADR e para efeitos da avaliação da exigência hídrica de cada cultura são utilizadas as «Tabelas de dotações de rega», disponíveis no portal da DGADR, sendo que a disponibilidade hídrica para cada perímetro de rega deverá ser evidenciada pela Entidade Gestora do Aproveitamento Hidroagrícola à Autoridade Nacional do Regadio. 4 - O presente despacho não é aplicável no caso de investimentos financiados pelo PDR2020 que já tenham execução material ou financeira garantida ou aprovada ou novas instalações de culturas permanentes no âmbito de trabalho de investigação/experimentação promovidos pelo INIAV. 5 - É revogado o Despacho n.º 17/2019, de 26 julho, do Ministro da Agricultura, Florestas e Desenvolvimento Rural. 6 - Dê-se conhecimento do presente despacho às Direções Regionais de Agricultura e Pescas e às Entidades Gestoras de Aproveitamentos Hidroagrícolas. 7 - O presente despacho entra em vigor no dia seguinte ao da sua assinatura."*

Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (destaca-se)

"1 Enquadramento - A pretensão tem lugar nos prédios mistos, denominados "Herdade da Murta" e "Herdade de Monte Novo do Sul" sitos em Santa Maria, descritos na Conservatória do Registo Predial de Alcácer do Sal, sob os n.ºs 2447/20071119 e 2480/20080417, respetivamente. Os prédios em causa estão inseridos, parcialmente, em área beneficiada pelo Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Sado (AHVS), e, como tal, estão sujeitos ao estabelecido no regime jurídico que tutela estas áreas - Regime Jurídico das Obras de Aproveitamento Hidroagrícola - a que se refere o Decreto-Lei n.º 269/82, de 10 de julho, na redação dada pelo Decreto-Lei n.º 86/2002, de 6 de abril (RJOAH), e respetiva legislação complementar, nomeadamente ao Regulamento da Obra de Rega do Vale do Sado, publicado em Diário do Governo n.º 17, IIIª Série, de 22 de janeiro de 1971.

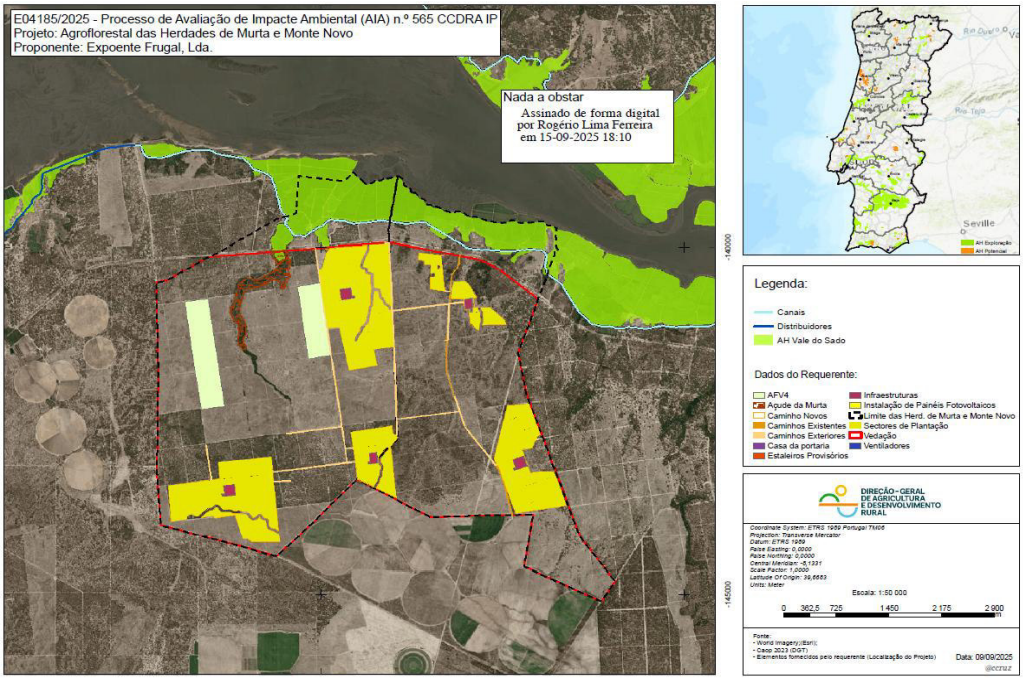


Figura 12 - Mapa de enquadramento (Parecer DGADR)

2. Análise - O projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, é um projeto privado e define-se pela criação de uma área agrícola de produção de tangerinas para comercialização, tendo por destino o mercado interno e a indústria transformadora. Apesar de parte dos prédios se integrar em AH, verifica-se que a localização das parcelas a cultivar estão fora do AHVS e não existe interferências com as respetivas infraestruturas.

3 Conclusão - Pelo exposto no ponto anterior, a Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural nada tem a opor em relação ao presente Estudo de Impacte Ambiental. O presente parecer não substitui qualquer outro parecer ou ato administrativo que deva ser emitido ou praticado por entidades com competência decisória relativa a outras condicionantes que onerem o prédio objeto de intervenção em análise."

Águas Públicas do Alentejo SA (destaca-se)

"A área de estudo do projeto não conflitua diretamente com infraestruturas existentes ou projetadas da AgdA-Águas Públicas do Alentejo, S.A, encontrando-se nas proximidades das captações que abastecem os aglomerados de Grândola, Comporta, Montevil, Albergaria, Montalvo, entre outros.

Com base na informação disponibilizada, manifestamos particular preocupação sobre os impactes que um projeto desta envergadura em fase de exploração possa desencadear (quer a nível qualitativo, quer a nível quantitativo), na massa de água subterrânea Bacia do Tejo-Sado / Margem Esquerda (PT05T3), onde se encontram várias captações da AgdA destinadas ao abastecimento público (planta em anexo).

O significativo volume a captar previsto (2,28 hm³/ano) conjugado com o expectável incremento no uso de substâncias nutritivas (fertilizantes e adubos), pesticidas e fitofármacos associados ao desenvolvimento das culturas irá gerar um impacto direto, permanente, irreversível, de médio/longo prazo e de magnitude elevada nas captações de água dos subsistemas da Comporta, Montevil e Mata de Valverde. Estas captações constituem-se como origens exclusivas para a produção de água para consumo humano de importantes aglomerados como Grândola, Comporta, Montevil, Albergaria, Montalvo, entre outros, conforme já mencionado.

Face a este cenário, impõe-se que sejam escrupulosamente cumpridas medidas mitigadoras de salvaguarda das origens para abastecimento público de água: O cumprimento do previsto no artigo 16. ° do PDM de Alcácer do Sal (…) O cumprimento das condições previstas no PIP 065603.2024.RH6 (…) O cumprimento das Medidas de Minimização e Planos de Monitorização identificados no EIA. m). Por último, na fase de exploração, deverá ser implementada a monitorização/pesquisa de todos os pesticidas e/ou substâncias ativas manuseadas, devendo atualização desta lista ser comunicada à Autoridade de AIA, anualmente, no âmbito do Relatório de Monitorização."

Infraestruturas de Portugal IP (destaca-se)

"Verifica-se que a área do Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novointerfere com a ER253, infraestrutura rodoviária sob jurisdição da IP. Deve ser respeitada a zona non aedificandi definida na alínea a) do n.º 8 do art.º 32º do EERRN, que estipula uma faixa de proteção de 20 m para cada lado do eixo da estrada e nunca a menos de 5 m da zona da estrada, bem como as limitações e proibições aplicáveis às obras e atividades a realizar em terrenos confinantes com estas infraestruturas, previstas no art.º 57º do Estatuto das Estradas da Rede Rodoviária Nacional EERRN.

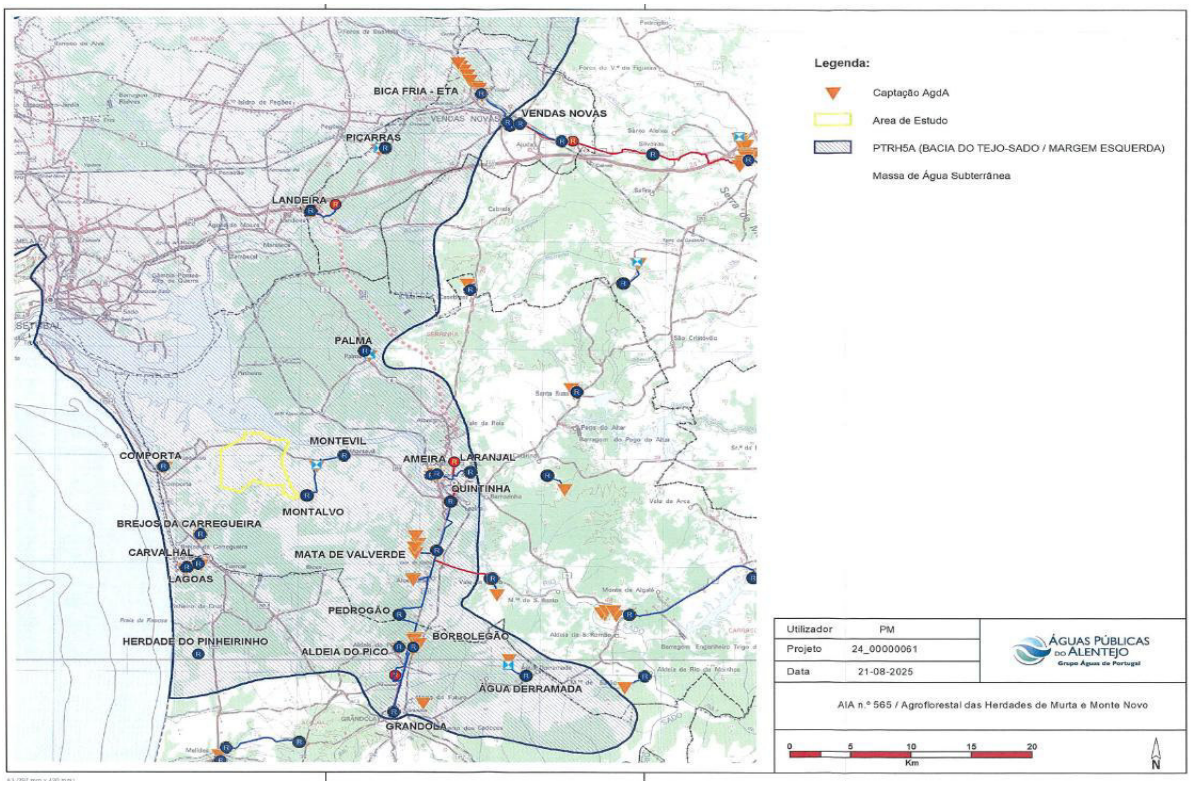


Figura 13 - Mapa de enquadramento (Anexo Parecer APAC)

O projeto contempla áreas de plantação de espécies arbóreas, bem como a implantação de uma vedação paralela à ER253, ambas cumprindo os afastamentos definidos para a zona non aedificandi da referida estrada. Verifica-se, ainda, que o local onde se prevê o desenvolvimento do projeto dispõe de vários acessos diretos à ER253, os quais carecem de licenciamento por parte da entidade competente, nos termos do n.º 1 do artigo 42.º do Estatuto das Estradas da Rede Rodoviária Nacional EERRN.

Qualquer outra interferência com a ER253, nomeadamente a instalação de infraestruturas associadas ao Projeto, designadamente as relativas à rede de rega, encontra-se igualmente sujeita a licenciamento pela Infraestruturas de Portugal, nos termos do n.º 1 do artigo 42.º do EERRN.

Face ao exposto emite-se parecer favorável condicionado à obtenção da licença dos acessos à ER253, independentemente de eventuais pré-existências de caminhos rurais, bem como à instalação de quaisquer infraestruturas que interfiram com a estrada e respetiva zona de servidão."

REN Gasodutos SA (destaca-se)

"A área de estudo do projeto "Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo" interseta a servidão da seguinte infraestrutura da RNTG: Linha 12000 do Gasoduto de Transporte Sines - Setúbal. A REN-G emite parecer favorável ao empreendimento, condicionado ao cumprimento dos seguintes requisitos:

1. A rearborização deverá respeitar o afastamento de 5 m ao eixo longitudinal do gasoduto de acordo com o Decreto-Lei n.º 11/94, ou seja, deverá ficar sem árvores uma faixa de 10 m centrada no eixo longitudinal do gasoduto;

2. Marcação prévia em campo, com recurso a detetor operado pelos técnicos da área de exploração da REN-G e com o apoio da equipa de topografia do promotor, da localização efetiva do gasoduto e dos limites da faixa de 10 m centrada no eixo longitudinal do gasoduto. Esta ação é essencial para a validação de todos os afastamentos ao gasoduto referidos em 1.;

3. Nas fases de preparação do terreno e de plantação, a título preventivo, o requerente deverá solicitar a presença de um técnico da área de exploração da REN-G com pelo menos 15 dias de antecedência do início de quaisquer atividades que afetem, direta ou indiretamente, a RNTG, de modo a que quaisquer intervenções no solo sejam devidamente confirmadas em campo e se evitem eventuais erros com impacto na servidão de gás."

E-REDES Distribuição

Não emitiu o Parecer solicitado.

Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Em resposta à solicitação da CCDR Alentejo para emissão de parecer sobre a subsidência do subsolo no concelho de Alcácer do Sal, mais especificamente na área do Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e de Monte Novo, em Avaliação de Impacte Ambiental, o LNEG informa:

1. Introdução - A subsidência do subsolo devido à sobre-exploração de águas subterrâneas está amplamente documentada na literatura científica internacional. Referem-se, como exemplos mais paradigmáticos, Santa Clara e San Joaquim Valleys na Califórnia/EUA, cidade do México/México, Lorca em Múrcia/Espanha, Rafsanjan e Bardaskan/Irão. O facto de se multiplicarem os casos pelo mundo levou a que a Unesco lançasse a LaSII - UNESCO Land Subsidence International Initiative, para acompanhamento próximo e atualização periódica da evolução.

2. Dados do Serviço Europeu de Monitorização de Movimentos do Solo - O Serviço Europeu de Monitorização de Movimentos do Solo (EGMS) do Copernicus resulta da aplicação de tecnologia de deteção remota a partir do espaço, utilizando dados de Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR) do satélite Sentinel-1, para detetar e medir movimentos do solo em toda a Europa com precisão milimétrica.

A técnica compara duas ou mais imagens de radar de abertura sintética (SAR) capturadas em momentos diferentes sobre a mesma região, para quantificar as alterações na superfície do terreno. Para visualizar deslocamentos puramente verticais é utilizado o produto Ortho - componente vertical do EGMS, um conjunto de dados geoespaciais processados, calibrados e disponíveis para visualização e análise na plataforma oficial em https://egms.land.copernicus.eu/. Cada ponto apresentado representa um refletor estável (PS - Persistent Scatterer) e está codificado por cores de acordo com a respetiva velocidade média em mm por ano. A convenção do EGMS segue a norma de que pontos verdes indicam estabilidade, pontos vermelhos e laranja indicam movimento de afastamento do satélite (subsidência), e pontos azuis indicam movimento em direção ao satélite (soerguimento) (Larsen et al, 2023).

O deslocamento desse ponto ao longo do tempo é visível na série temporal InSAR associada bastando, para tal, selecionar o ponto e visualizar o gráfico que mostra as aquisições de dados SAR num dado período temporal (Larsen et al, 2023). Os pontos de medição são avaliados com base num modelo de deslocamento. A velocidade média de cada ponto de medição é derivada da série temporal de medições do respectivo ponto. Os dados de séries temporais são úteis para revelar desvios da velocidade média, como acelerações e auxiliam na compreensão das tendências e evolução do movimento. O LNEG é embaixador da rede Copernicus Academy e Relays do Programa Copernicus.

3. Deslocamentos verticais no Sector Margem Esquerda do Sado na Região de Alcácer do Sal e nas Herdades de Murta e de Monte Novo - Globalmente, a Margem Esquerda do Sado apresenta deslocamentos verticais no subsolo, maioritariamente de subsidência (vermelhos e laranjas) e poucas zonas estáveis (verde) ou relativamente estáveis (azul-turquesa e amarelo). Identificam-se as Herdades da Comporta, Herdade da Batalha e Herdade da Asseiceira como os locais com maiores subsidências na região. As Herdades de Murta e de Monte Novo, herdades-alvo no EIA, acompanham a tendência global do sector. Na Herdade de Murta observa-se um padrão heterogéneo, com áreas bastante estáveis e outras subsidentes, enquanto que na Herdade de Monte Novo o padrão é maioritariamente subsidente.

Tomando, como exemplo, uma amostra de 31 pontos na Herdade de Monte Novo, numa área com alguma extensão de subsidência (Fig.16) constata-se que, desde janeiro de 2019 a dezembro de 2023, houve um deslocamento acumulado de cerca de -25 mm, a uma velocidade média de -4,97 mm/ano. Na Herdade de Murta, uma amostra vasta com 512 pontos mostra uma subsidência média acumulada de -15 mm, entre janeiro de 2019 a dezembro de 2023, com uma velocidade média de -2.88 mm/ano (Fig.17).

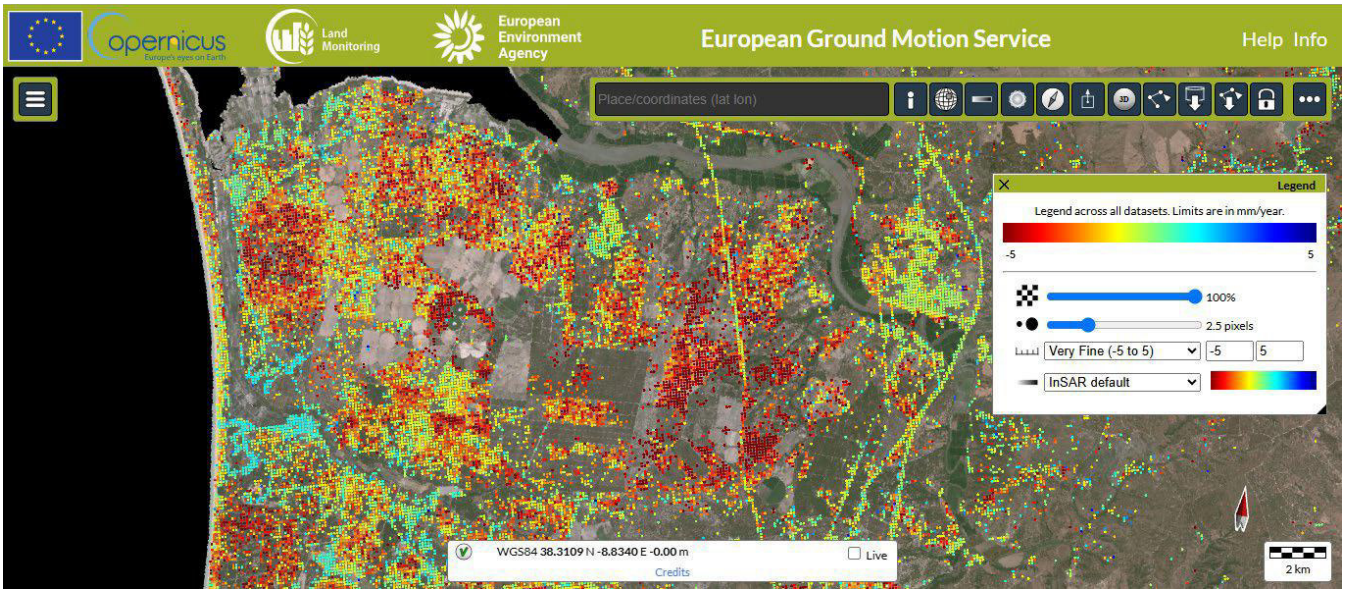


Figura 14 - Medições InSAR na margem esquerda do Sado. Os deslocamentos verticais estão discretizados de -5 (vermelho) a +5 (azul-escuro) mm por ano

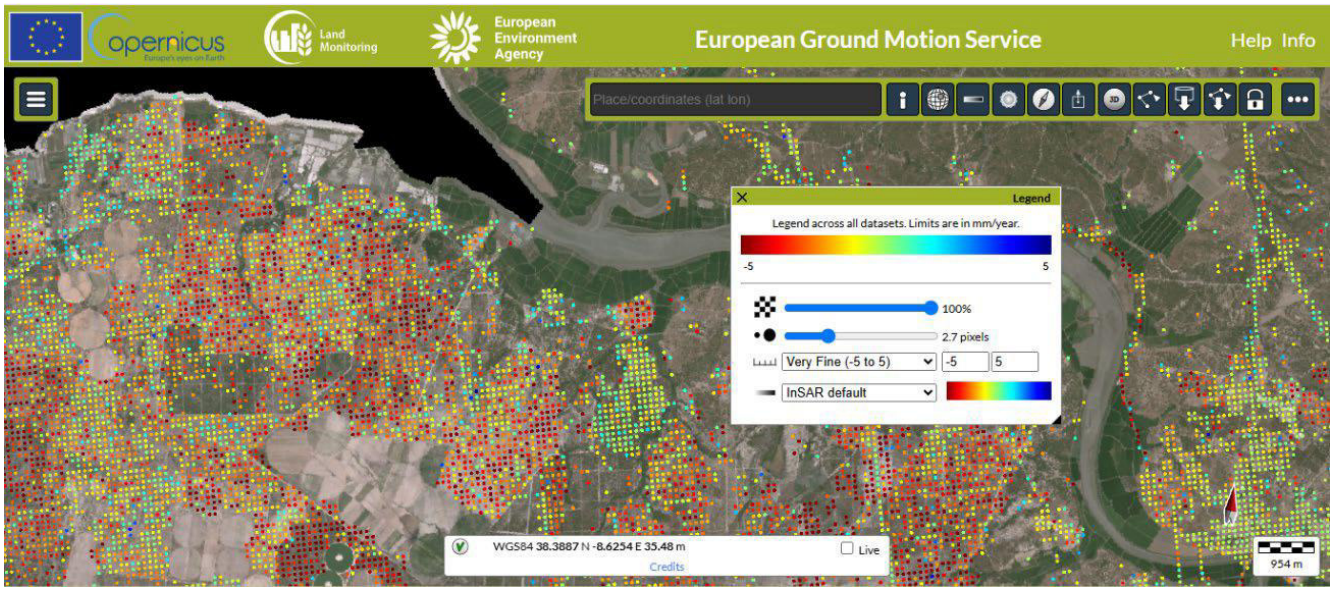


Figura 15 - Medições InSAR nas Herdades de Murta e de Monte Novo. Os deslocamentos verticais estão discretizados de -5 (vermelho) a +5 mm (azul-escuro) por ano

4. Interpretação das Observações - Para compreender a origem da subsidência indica-se, de forma não exaustiva, a informação analisada: i) litologias e a estrutura, ii) características hidrogeológicas da região, iii) padrões espaciais e temporais de subsidência, iv) séries piezométricas SNIRH (evolução de níveis freáticos de background e do período de observação InSAR), v) série climatológica da estação de Alcácer do Sal do IPMA (precipitação e evapotranspiração) e balanço hídrico, vi) o contexto de exploração de águas subterrâneas conhecido na área e vii) os indicadores dos Planos de Gestão de Região Hidrográfica 2022-2027 relativos às disponibilidades hídricas, ao estado quantitativo e qualitativo da massa de água.

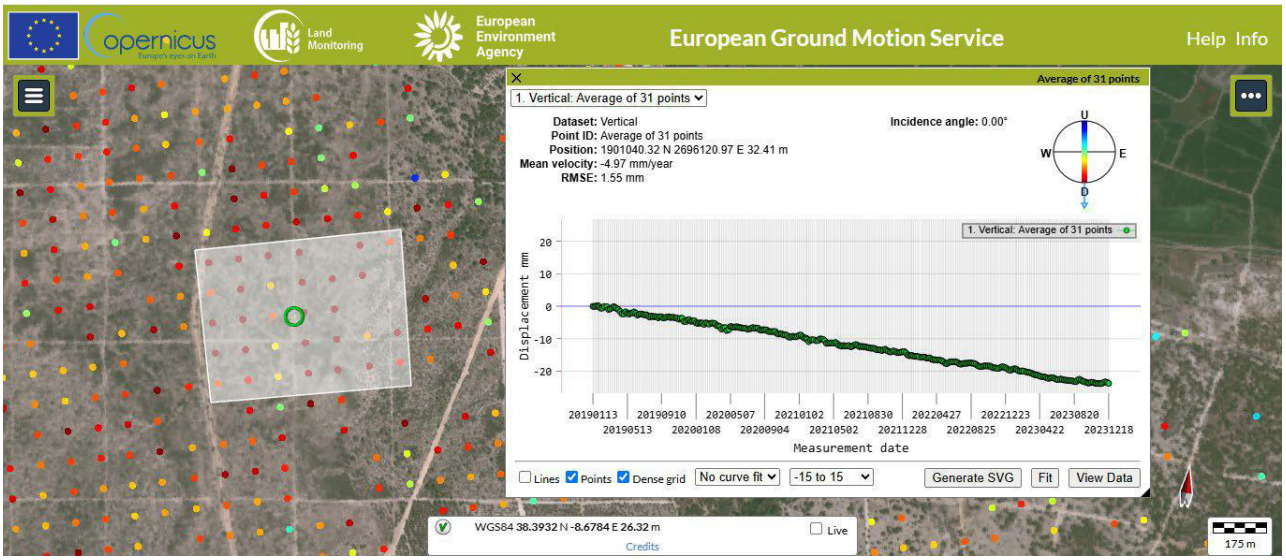


Figura 16 - Velocidade média de subsidência de -4.97 mm/ano para 31 pontos na zona central da Herdade de Monte Novo, no período de janeiro de 2019 a dezembro de 2023

A subsidência observada é de grande extensão espacial e de velocidade lenta e contínua e tem como origem a exploração de águas subterrâneas. Ocorre quando: 1) o aquífero contém camadas de sedimentos finos e compressíveis (argilas, siltes e areias finas), como na margem esquerda do Sado; 2) o nível da água (nível piezométrico) ou a pressão da água nos poros diminui. Os sedimentos compactam-se, reduzem o seu volume e provocam o abatimento na superfície terrestre. Cumulativamente, a recarga dos aquíferos tem vindo a diminuir, pela redução da precipitação e aumento da evapotranspiração, culminando na atual situação de escassez extrema indicada pelo Índice de escassez WEI+, de 70%, para o período 1989- 2015, na bacia do Sado. O Índice de escassez WEI+ é definido como a razão entre o volume total de água captado e as disponibilidades hídricas renováveis (Plano de Gestão da Região Hidrográfica RH6 Sado e Mira, 3.º ciclo de planeamento de 2022 a 2027, na Parte2 - Volume B, página 34). O declínio das superfícies piezométricas encontra-se bem patente nas séries piezométricas dos piezómetros mais antigos do SNIRH, com cerca de 2 décadas de dados. Observa-se uma clara descida dos níveis piezométricos a partir de 2016/17 até a atualidade.

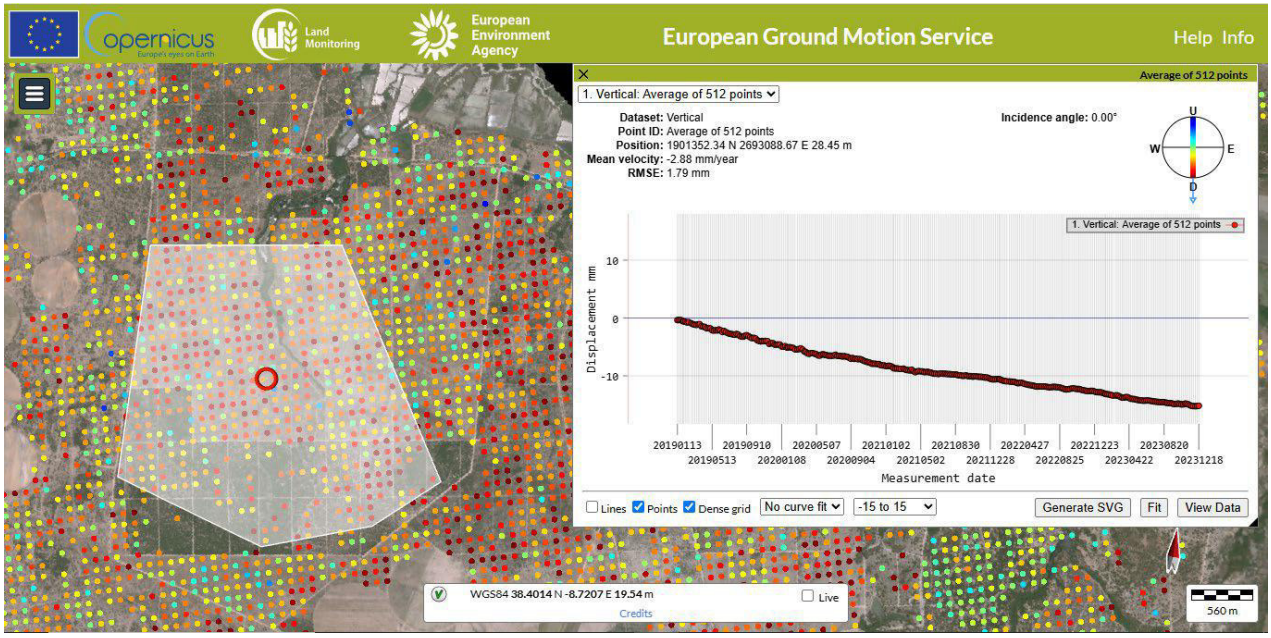


Figura 17 - Velocidade média de subsidência de -2.88 mm/ano para 512 pontos na Herdade de Murta, no período de janeiro de 2019 a dezembro de 2023

As perdas potenciométricas variam de 1 a 10 m, um declínio hidráulico que se tem vindo a acentuar, na sequência do aumento de extrações que não são compensadas pela recarga. O piezómetro 476/21 do SNIRH da APA (Furo vertical - RA4) na Herdade dos Cachopos, herdade contígua à de Monte Novo, com 150 m de profundidade e a captar entre os 73 e 145 m, é um exemplo deste declínio. Se compararmos o nível mês a mês para o ano hidrológico de 2024/2025 com a média mensal da série 2003/2004 a 2024/2025, verificamos que o nível atual está muito abaixo da média ao longo de todo o ano hidrológico (Fig.18). De maio a setembro, o nível decai e permanece abaixo do nível do mar. Dado que o ano 2024/2025 foi particularmente chuvoso, a descida do nível não pode ser explicada pela falta de recarga, mas com a intensificação da rega nesses meses. Observando a série de 21 anos verifica-se que o stress hidráulico começa a acentuar-se com o início das explorações agrícolas intensivas.

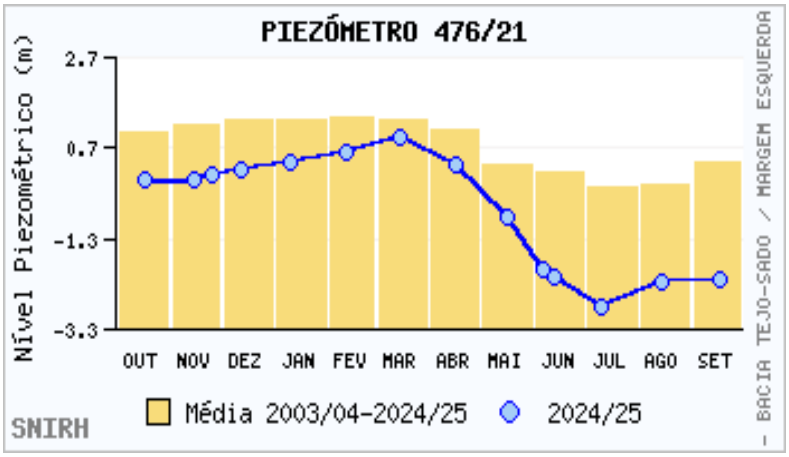


Figura 18 - Evolução do nível piezométrico no piezómetro 476/21 do SNIRH da APA na Herdade dos Cachopos. Linha azul: níveis piezométricos mensais para o ano de 2024/2025; Barras amarelas: média mensal dos níveis desde 2003/2004 a 2024/2025

O facto da exploração do volume de recursos renováveis ter atingido o seu limite está plasmado no Plano de Gestão da Região Hidrográfica RH5A Tejo e Ribeiras do Oeste, 3.º ciclo de planeamento de 2022 a 2027, na Parte 2 - Volume A, páginas 164-165, onde é referido que a massa de água Bacia do Tejo-Sado / Margem Esquerda, onde o Sector Margem Esquerda do Sado se insere, deve ser alvo de atenção especial, devendo-se avaliar os novos pedidos de extrações atendendo aos recursos hídricos subterrâneos disponíveis, para que não se verifique um desequilíbrio entre os recursos e as utilizações.

Mais se refere que o volume extraído pelas captações existentes está próximo dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis e que a pressão significativa que coloca a massa de água em risco corresponde ao setor agrícola. A compactação das litologias não consolidadas é, geralmente, irreversível e tem como consequência a diminuição da capacidade de armazenamento do aquífero, pela redução no tamanho e no número de espaços porosos que anteriormente armazenavam água, afetando a sua produtividade.

5. Conclusão - Face ao exposto, o LNEG conclui que o projeto não deve ser aprovado, por: se observar uma subsidência generalizada no Sector Margem Esquerda do Sado na Região de Alcácer do Sal, evidenciando que o aquífero está a ser alvo de uma extração de água superior à reposta pela recarga; se observar atualmente subsidência nas Herdades de Murta e de Monte Novo devido à depleção do aquífero antes da implementação do projeto; introduzir maior pressão sobre as águas subterrâneas em termos quantitativos e qualitativos, quer pela quantidade de água que vai consumir, quer pelas substâncias químicas que vai adicionar, impactes cumulativos muitos significativos e não compensáveis; representar um risco acrescido para a sustentabilidade dos recursos hídricos da região e para a equidade no acesso e utilização desses recursos entre os diferentes utilizadores.

Bibliografia complementar: Gambolati, G., and Teatini, P., 2021. Land Subsidence and its Mitigation. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 92 p. Disponível em https://gw-project.org/pt-br/download/land-subsidence-and-its-mitigation/. Ferretti, A., Passera, E., Capes, R., 2023. End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS). Algorithm Theoretical Basis Document, versão 3. Copernicus da Agência Europeia do Ambiente. Disponível em https://land.copernicus.eu/en/technical-library/egms-algorithm-theoretical-basisdocument/@@download/file. Kotzerke, P., Siegmund, R., Langenwalter, J., 2022. End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS). Product User Manual, versão 1.6. Copernicus da Agência Europeia do Ambiente. Disponível em https://land.copernicus.eu/en/technical-library/egms-product-user-manual/@@download/file. Larsen, Y., Marinkovic, P., Dehls, J., Stødle, D., 2023. End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS). End User Interface Manual, versão 3. Copernicus da Agência Europeia do Ambiente. Disponível em https://land.copernicus.eu/en/technical-library/egms-end-user-interface-manual/@@download/file. LaSII Report, 2024. onde se pode encontrar uma vasta lista de trabalhos e relatórios publicados no último ano. Disponível em https://www.landsubsidence-unesco.org/wp-content/uploads/2025/01/annual_report_2024.pdf. Poland, J., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, International Hydrological Programme, Working Group 8.4, UNESCO. Disponível em https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/rgws/Unesco/PDFChapters/Guidebook.pdf.

Pareceres externos recebidos

Os principais assuntos foram ponderados e encontram-se refletidos no Parecer CA.

2.5 SITUAÇÃO SEM PROJETO

O Projeto "Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo" tem:

- A componente agrícola com 433,30 ha, sendo 360,63 ha de área efetiva de plantação de tangerinas e 72,67 ha de infraestruturas de apoio;
- A componente florestal com 1.650,13 ha, incluídos em Plano de Gestão Florestal (PGF), com 366,12 ha para conservação e restauro e 80 ha para reflorestação com pinheiro-manso e pinheiro-bravo.

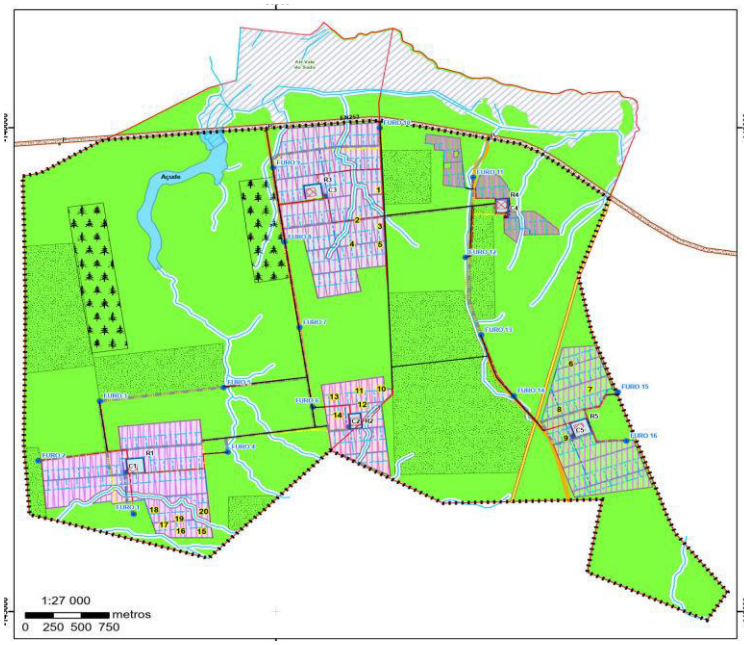


Figura 19 - Distribuição das componentes do Projeto, a rosa-cinzento a agrícola e a verde a florestal

Indica o EIA (5.7.8 - Evolução Previsível da Situação Atual na Ausência do Projeto), *"No caso de não se concretizar este projeto, ou outro semelhante, será expectável que a área continue a manter as caraterísticas atuais, com a ameaça crescente que representa a invasão de acácias, sobretudo na zona nordeste da Herdade de Monte Novo. Nas restantes áreas, estima-se que as comunidades florísticas e faunísticas mantenham a sua riqueza."*

Sobre *"(…) a ameaça crescente que representa a invasão de acácias, sobretudo na zona nordeste da Herdade de Monte Novo (…)",* importa referir que:

- Nos trabalhos de campo, na elaboração do EIA, foi identificada a presença de espécies exóticas invasoras, nomeadamente acácias na área de montado, a nordeste da Herdade do Monte Novo, em área pertencente à componente florestal e incluída no já apresentado Plano de Gestão Florestal (PGF);
- O PGF é obrigatório para propriedades com mais de 100 ha de componente florestal, ao abrigo do artigo 13.º do Decreto-Lei n.º 65/2017, de 12 de junho (Regime jurídico dos planos de ordenamento, de gestão e de intervenção de âmbito florestal);

Sobre o PGF das Herdades de Murta e Monte Novo, importa referir que será avaliado pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas IP (ICNF), após decisão do presente procedimento de AIA, por não conter as áreas associadas à componente agrícola, onde o Projeto propõe o abate de 61.756 exemplares de pinheiro-manso (191,85 ha) e de 4.770 exemplares de pinheiro-bravo (34,79 ha).

Assim, considera-se que na ausência de Projeto, a situação de referência identificada no EIA tem tendência de evolução para formações vegetais com maior valor ecológico, se implementadas as ações e medidas de gestão incluídas no PGF, também nas áreas da componente agrícola, através das operações silvícolas de beneficiação dos atuais povoamentos florestais.

3. CONSULTA PÚBLICA

Decorreu durante 30 dias úteis, de 30/07/2025 até 10/09/2025. Consta no Relatório da Consulta Pública:

"Foram recebidas 437 participações, nomeadamente de particulares, individuais ou coletivos (426), de associações de defesa do Ambiente e outras (10) e de uma (1) entidade da Administração (Município de Alcácer do Sal). Destas, 425 participações são discordantes do projeto, 5 de concordância, 2 reclamações e 2 sugestões.

A esmagadora maioria das participações manifesta oposição ao projeto, sobretudo devido a riscos hídricos: consumo considerado excessivo, captações profundas previstas (até cerca de 288 m), utilização estimada de aproximadamente 65% da recarga anual local (aprox. 2,28 hm³/ano) e agravamento de um aquífero já classificado no PGRH 2022-2027 como em "estado crítico/sobre-explorado", com défice anual assinalado por diversos participantes (aprox. 3 mil milhões de litros/ano) e descidas piezométricas qualificadas como "significativas". "São igualmente reiterados os impactes cumulativos com outros empreendimentos, incluindo relatos locais de albufeiras e açudes secos (Vale de Coelheiros desde 2020; Murta e Cachopos em níveis mínimos), desaparecimento de nascentes e aumento da profundidade dos furos necessários, defendendo-se a suspensão de novos licenciamentos até à existência de inventário atualizado, implementação obrigatória de telemetria dos consumos e encerramento de captações ilegais.

Do ponto de vista ecológico, é apontada incompatibilidade com a Rede Natura 2000 (ZEC Comporta-Galé Estuário do Sado; ZPE Açude da Murta; IBA; RAMSAR), perda de habitats e espécies (incluindo flora RELAPE e avifauna), desmatação e abate de dezenas de milhares de pinheiros, bem como a substituição por monocultura intensiva em solos arenosos de baixo potencial, com riscos acrescidos de erosão, desertificação e contaminação por pesticidas fitofármacos.

No plano social, são referidos o recurso maioritário a mão-de-obra imigrante em condições precárias, a pressão acrescida sobre o parque habitacional das áreas envolventes ao projeto, a reduzida mais-valia local e a conflitualidade com o setor turístico.

Em termos jurídicos, invoca-se a Diretiva Habitats, a Rede Natura 2000, a Lei de Bases do Ambiente e a Diretiva-Quadro da Água, solicitando decisão desfavorável em coerência com a rejeição anterior de um projeto de abacateiros na mesma área.

Há poucas intervenções de concordância e são sucintas; destacam apreciações genéricas como "interessante para a população" ou a ideia de reorganização da floresta, sem desenvolvimento técnico sobre os recursos hídricos, biodiversidade ou medidas de mitigação/monitorização, e sem refutar as preocupações dominantes dos restantes contributos.

Relativamente à participação das associações, todas se manifestaram de forma crítica e desfavorável ao projeto, embora com diferentes ênfases nos argumentos apresentados:

- *A Associação Dunas Livres expressa uma oposição veemente ao projeto, qualificando a sua eventual autorização como "criminosa". Os argumentos centram-se na alegada destruição da Rede Natura 2000, resultante da intensificação agrícola numa Zona de Especial Conservação, bem como na previsão de extração de água para além da capacidade de recarga do aquífero, agravada pelo impacte das alterações climáticas. A associação apela a que os decisores assumam a responsabilidade de proteger as populações e o território.*

- *A Associação Proteger Grândola destaca que o projeto representa uma ameaça direta aos valores naturais da Serra de Grândola e da região circundante. Entre os principais riscos identificados estão a contaminação dos aquíferos devido ao uso de pesticidas e fertilizantes, a perda de biodiversidade e a adoção de um modelo de exploração considerado insustentável. Conclui apelando ao indeferimento do projeto.*
- *A Associação ZERO também assume uma posição crítica, realçando que a agricultura intensiva proposta é incompatível com a conservação do solo e da água, além de comprometer espécies protegidas e corredores ecológicos. Salienta, ainda, o elevado consumo de água numa região já marcada por escassez hídrica e acusa o estudo de impacte ambiental de não apresentar alternativas sustentáveis. A recomendação final é de parecer desfavorável e rejeição do projeto.*
- *A associação ALMARGEM centra o seu parecer nos efeitos negativos de um modelo baseado na monocultura intensiva de tangerinas. Identifica impactes irreversíveis sobre solos e recursos hídricos, bem como a destruição de habitats e espécies de interesse comunitário. Critica igualmente a incoerência do projeto com as políticas de mitigação das alterações climáticas. Conclui exigindo a rejeição inequívoca do projeto e pedindo o reforço da proteção legal da área.*
- *Por sua vez, o GEOTA sublinha a incompatibilidade do projeto com os objetivos de ordenamento e conservação da natureza. Denuncia o consumo intensivo de recursos naturais, bem como falhas graves no estudo de impacte ambiental, nomeadamente a ausência de uma avaliação cumulativa e a subavaliação dos riscos. Considera que o projeto abre um precedente perigoso para a proliferação da agricultura intensiva e recomenda a sua rejeição, defendendo alternativas baseadas em modelos agroecológicos.*
- *A Liga para a Proteção da Natureza (LPN) considera que a nova versão do projeto mantém impactes significativos, não passíveis de minimização nem de compensação, sobre habitats protegidos na ZEC Comporta-Galé, em particular o 2260, apesar da redução da área e da alteração da cultura para tangerina. A entidade refuta as medidas mitigadoras propostas, por não reconstituírem o habitat nem tornarem o impacte reversível, e sublinha a tendência de Relatório da Consulta Pública do EIA do Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo (HM-MN) decréscimo deste habitat, associada a desmatações e à acumulação de efeitos com outros projetos. Conclui que não existem alternativas de localização viáveis e que o projeto é incompatível com os objetivos de conservação da Rede Natura 2000, devendo, por isso, merecer decisão desfavorável.*
- *Na sua participação a CHIRO - Associação Morcegos.PT conclui que a avaliação é insuficiente para morcegos, por não ter realizado amostragens de campo, usar bibliografia desatualizada e omitir impactes críticos como alterações de habitat, perturbações noturnas, atropelamentos e, sobretudo, colisões com ventiladores anti-geada numa área ecologicamente sensível junto ao Estuário do Sado e SIC Comporta/Galé, recomendando corrigir estatutos de ameaça, efetuar um Ano 0 robusto com amostragem acústica e prospeção de abrigos, quantificar impactes (incluindo cumulativos), aplicar medidas de mitigação e compensação específicas além de caixas-abrigo e implementar um plano de monitorização plurianual da atividade, abrigos e mortalidade, com foco em equipamentos e vias internas.*
- *A Associação de Agricultores de Alcácer do Sal reforça a insustentabilidade hídrica com números de balanço do aquífero da Margem Esquerda do Sado (T3) (perda de reservas em 20 anos, consumo anual a exceder a recarga e défice médio anual), alertando para riscos diretos ao abastecimento humano, à agricultura e aos ecossistemas, bem como para a perda irreversível de floresta mediterrânica substituída por monocultura irrigada; conclui exigindo a rejeição do projeto, a proteção e recuperação do T3, e o apoio a modelos agrícolas sustentáveis e culturas tradicionais adaptadas, em linha com o histórico do procedimento AIA e pareceres de ONGA sobre impactes negativos significativos.*
- *A Associação de Agricultores de Grândola sublinha que a reformulação mantém intactas as premissas problemáticas: localização, escala, sistema de rega e alteração substancial do uso do solo, com abate de mais de 226 ha de área florestal e captação exclusiva por águas subterrâneas (16 furos entre 178 e 288 m; consumo estimado próximo de 2,5 hm^3/ano), num território árido inserido no Sistema Aquífero Tejo-Sado - Margem Esquerda, já sinalizado com tendência de degradação e sujeito a restrições recentes a novas captações; invoca ainda estudos técnicos (WEI+ e caracterização hidrogeológica do T3) e a necessidade de avaliação de impactes cumulativos e monitorização/fiscalização efetiva.*
- *O grupo de cidadania ativa em defesa do ambiente - Alcácer P'lo Ambiente apresentou um parecer técnico hidrogeológico detalhado sobre o "Sector a Sul do Rio Sado" do Sistema Aquífero Tejo-Sado (Margem Esquerda), avaliando o enquadramento geológico, dinâmica piezométrica, recarga e balanço hídrico sob pressão agrícola, turística e climática. O estudo conclui que a exploração atual está no limiar da sobre-exploração, podendo já exceder os Recursos Hídricos Subterrâneos Disponíveis em anos secos e sob cenários climáticos adversos.*
- *O Município de Alcácer do Sal emitiu parecer desfavorável, por falta de elementos técnicos suficientes quanto aos riscos para os recursos hídricos e o ordenamento do território. Embora apresentado como "projeto de execução", considera aquela entidade que o EIA carece de pormenorização das edificações e infraestruturas (projetos de arquitetura e especialidades), pelo que deve ser tratado como "estudo prévio" nesta fase. No enquadramento com o Plano Diretor Municipal, o município aponta a ausência de verificação do Art. 12.º (Estrutura Ecológica Municipal)*

e condiciona o Art. 26.º à obtenção de pareceres favoráveis das entidades competentes face a servidões e restrições ao uso do solo. Em "Espaços Florestais de Produção" (Art. 56.º), alerta para a inversão do uso dominante de florestal para agrícola, e os expectáveis efeitos cumulativos com projetos vizinhos, implicando a perda direta de 433,30 ha de área de produção florestal e exige prova de sustentabilidade ambiental da reconversão na ZEC Comporta-Galé. Quanto a infraestruturas e energia, a unidade de produção para autoconsumo (UPAC) fotovoltaica proposta sobre cinco reservatórios requer parecer vinculativo da Comissão Municipal de Gestão Integrada de Fogos Rurais e cumprimento do DL 82/2021 (Arts. 60.º-61.º), mas a caracterização técnica é insuficiente para enquadramento no Regime jurídico da urbanização e edificação - RJUE. Persistem lacunas sobre casas de rega, reservatórios, postos de transformação, portaria e módulos, não havendo processos formais submetidos na câmara para apreciação. Em recursos hídricos, o município prioriza o abastecimento humano e alerta para secas prolongadas, notando que as captações previstas são mais profundas do que as públicas próximas e podem usar o mesmo aquífero, faltando o parecer da Águas Públicas do Alentejo, S.A. sobre o impacte. Face também à análise insuficiente de impactes cumulativos e à falta de articulação entre componentes agrícola (tangerina) e florestal, o município conclui não ser possível emitir parecer favorável nesta fase e remete a posição à CCDRA enquanto Autoridade de AIA.

Em síntese, as participações convergem para um diagnóstico comum: o projeto em análise comporta riscos graves para os recursos hídricos, os solos, a biodiversidade e o ordenamento do território. Consideram que o modelo proposto é insustentável e incompatível com as políticas de conservação e adaptação climática, recomendando de forma clara a emissão de um parecer desfavorável e a não aprovação do projeto."

Contributos recebidos

Os principais assuntos foram ponderados e encontram-se refletidos no Parecer CA.

4. CONCLUSÃO

Projeto

A sujeição a procedimento de AIA

O projeto "Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo" localiza-se no concelho de Alcácer do Sal, a 5 km de Comporta e a 15 km de Alcácer do Sal.

A área do projeto situa-se totalmente na Rede Natura 2000 em Zona Especial de Conservação Comporta-Galé e em Zona de Proteção Especial do Açude da Murta.

No Regime Jurídico da AIA o projeto é incluído no anexo II n.º 1 alínea d) Área Sensível - Desflorestação destinada à conversão para outro tipo de utilização das terras ≥ 10 ha.

O projeto propõe alterar o atual uso do solo florestal, com abate de 61.756 de exemplares de pinheiro-manso e 4.770 de pinheiro-bravo, para criar um uso agrícola intensivo de regadio com tangerinas em 433,30 ha.

A componente agrícola tem 360,63 ha para plantação e 72,67 ha para infraestruturas de apoio:

- A plantação de 172 setores, em solos maioritariamente da Classe de Capacidade de Uso *E* seguida da Classe *D*, com limitações de muito severas a severas, não suscetíveis de utilização agrícola ou suscetíveis de utilização agrícola pouco intensiva, com riscos de erosão de muito elevado a elevado;
- A necessidade do consumo de água subterrânea estimado em 2,28 hm³/ano, captado por 16 furos profundos entre os 178 e 288 m, com bombas submersíveis de 60 cv, e caudais extraídos entre os 21 a 53 L/s. A água captada é encaminhada por condutas enterradas, com 15.434 m de extensão para 5 reservatórios de armazenamento e com 37.275 m pela rede de rega;
- A instalação de 20 ventiladores anti-geada distribuídos nos setores de plantação, e com utilização de fertilização, herbicidas e fitofarmacêuticos;
- A contratação de 50 trabalhadores na fase de construção (1 ano) e de 50 permanentes e 150 temporários na fase de exploração (25 a 30 anos), ficando os trabalhadores agrícolas alojados em habitações em Alcácer do Sal;
- A produção estimada em 100 ton/dia a transportar em 5 camiões/dia na EN 253, até ao Centro de Embalagem e Distribuição em Alcácer do Sal.

Avaliação de impactes ambientais - Componente agrícola

Impactes negativos muito significativos

O fator Sistemas Ecológicos, principalmente devido à afetação de valores naturais de interesse e prioritários, habitas e espécies listadas no Anexo B-I do Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, na atual redação.

O fator Recursos Hídricos, principalmente devido à captação de água subterrânea no Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda, em termos de variação da superfície piezométrica.

Impactes negativos significativos

O fator Alterações Climáticas, principalmente devido à desflorestação implicar a perda de biomassa correspondente a 18.145,06 tCO_2eq e a plantação de tangerineiras compensar as emissões num total de 1.147,15 tCO_2eq/ano, e ao local proposto possuir riscos associados a temperaturas elevadas, fenómenos de seca, incêndios e redução de disponibilidades hídricas.

Impactes cumulativos negativos significativos

O fator Sistemas Ecológicos, na Zona Especial de Conservação Comporta-Galé, que com a área associada do projeto eleva a superfície agrícola existente ou a implementar para 12% ou 4.000 ha (áreas turísticas ocupam 12%, não contabilizadas as áreas industriais e infraestruturas).

O fator Recursos Hídricos, no Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda, em situação crítica desde julho de 2022, que com o volume captado associado ao projeto eleva os consumos de abastecimento público, agrícola e industrial para 369,33 hm³/ano.

Impacte negativo de pouco significativo a significativo

O fator Ruído, principalmente devido à emissão de níveis sonoros durante o período noturno, entre as 23h e às 07h, pelo funcionamento de 20 ventiladores anti geada, de novembro a fevereiro.

Impacte positivo significativo

O fator Sócioeconomia, principalmente devido ao incremento dado à economia local, quer no comércio/restauração pela chegada dos trabalhadores, quer nas empresas pela necessidade no fornecimento de bens e serviços.

Plano Diretor Municipal (PDM) de Alcácer do Sal - Componente agrícola

Planta de Ordenamento

A totalidade da área do projeto incidindo em "Espaços Florestais de Produção", de acordo com o artigo 26º do Regulamento do PDM "Condições gerais de viabilização dos usos do solo", o projeto:

- Tem enquadramento no nº 2, sendo o uso dominante florestal compatível na alteração para o uso complementar agrícola;
- Não tem enquadramento no nº 4, por a alteração do uso dominante florestal para o uso complementar agrícola, no atual procedimento de AIA, não suscitar de modo eficaz a minimização dos prejuízos e/ou inconvenientes de ordem ambiental nos fatores Sistemas Ecológicos e Recursos Hídricos.

A totalidade da área do projeto incidindo em "Estrutura Ecológica Municipal - Habitats prioritários da Rede Natura 2000", de acordo com o artigo 40º "Alterações do uso do solo nas áreas classificadas", o projeto:

- Não possui enquadramento, por a alteração do uso dominante florestal para o uso complementar agrícola, no atual procedimento de AIA, não obter autorização do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, IP.

Planta de Condicionantes

A totalidade da área do projeto, incindido em "Rede Natura 2000 - Zona Especial de Conservação Comporta Galé (PTCON0034) e Zona de Proteção Especial do Açude da Murta (PTZPE0012)", o projeto:

- Não possui enquadramento, por a alteração do uso dominante florestal para o uso complementar agrícola, no atual procedimento de AIA, não obter parecer favorável ou favorável condicionada do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, IP.

Pareceres externos

Associação de Beneficiários do Vale do Sado

Informa, entre outras *"(…) profunda preocupação com o impacto significativo de projetos desta natureza e dimensão no abastecimento de água à população do concelho de Alcácer do Sal e na agricultura da região (onde não pode ser esquecida a importância ambiental da cultura do arroz no Estuário do Sado). Assim, projetos desta natureza não contribuem para o uso eficiente da água e agravam, de forma irreversível, a enorme pressão existente sobre um recurso já escasso, como a água, pois dependem de volumes de água que já não existem."*

Águas Públicas do Alentejo SA

Informa, entre outras *"(…) particular preocupação sobre os impactes que um projeto desta envergadura em fase de exploração possa desencadear (quer a nível qualitativo, quer a nível quantitativo), na massa de água subterrânea Bacia do Tejo-Sado / Margem Esquerda (PT05T3), onde se encontram várias captações da AgdA destinadas ao abastecimento público (…) O significativo volume a captar previsto (2,28 hm³/ano) conjugado com o expectável*

incremento no uso de substâncias nutritivas (fertilizantes e adubos), pesticidas e fitofármacos associados ao desenvolvimento das culturas irá gerar um impacto direto, permanente, irreversível, de médio/longo prazo e de magnitude elevada nas captações de água dos subsistemas (…) exclusivas para a produção de água para consumo humano de importantes aglomerados como Grândola, Comporta, Montevil, Albergaria, Montalvo, entre outros (…).”

Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Informa, entre outras *“(…) que o projeto não deve ser aprovado, por: se observar uma subsidência generalizada no Sector Margem Esquerda do Sado na Região de Alcácer do Sal, evidenciando que o aquífero está a ser alvo de uma extração de água superior à reposta pela recarga; se observar atualmente subsidência nas Herdades de Murta e de Monte Novo devido à depleção do aquífero antes da implementação do projeto; introduzir maior pressão sobre as águas subterrâneas em termos quantitativos e qualitativos, quer pela quantidade de água que vai consumir, quer pelas substâncias químicas que vai adicionar, impactes cumulativos muitos significativos e não compensáveis; representar um risco acrescido para a sustentabilidade dos recursos hídricos da região e para a equidade no acesso e utilização desses recursos entre os diferentes utilizadores.*

Situação sem projeto

A área pertencente à componente agrícola será associada ao Plano de Gestão Florestal (PGF) das Herdades de Murta e Monte Novo, já entregue no Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas IP, a avaliar após o concluído o presente procedimento de AIA, e já contendo a componente florestal, de acordo com o artigo 13.º do Decreto-Lei n.º 65/2017, de 12 de junho (Regime jurídico dos planos de ordenamento, de gestão e de intervenção de âmbito florestal).

Não se concretizando a componente agrícola, a situação de referência identificada no EIA *“(…) a presença de espécies exóticas invasoras, nomeadamente acácias (…)”* terá tendência para evoluir para formações vegetais com melhor valor ecológico, se implementadas as ações e medidas de gestão do PGF, nas operações silvícolas de melhoria e beneficiação dos atuais povoamentos florestais.

Consulta Pública

Foram recebidas 437 participações, 425 discordantes do projeto, 5 de concordância, 2 reclamações e 2 sugestões.

A esmagadora maioria das participações manifestando oposição ao projeto, estão relacionadas com questões associadas aos fatores Sistemas Ecológicos e Recursos Hídricos.

No fator Sistemas Ecológicos, o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas IP informa que foram ponderadas e encontram-se refletidas no presente Parecer as principais questões associadas à afetação da Rede Natura 2000, valores naturais presentes na área do projeto, como habitats e espécies de interesse comunitário e impactes cumulativos.

No fator Recursos Hídricos, e de acordo com o indicado no último parecer, a APA/Administração da Região Hidrográfica do Alentejo IP informa:

- Que devido à elevada sensibilidade da área de implantação do projeto, a sua localização sobre a massa de água subterrânea Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda (P05T3), que constitui a única fonte de abastecimento para uma população muito elevada, da ordem de 1,5 milhões de habitantes, incluindo a população local junto à área do projeto, apresentando riscos significativos de impactes quantitativos e químicos irreversíveis;
- A APA IP, enquanto Autoridade Nacional da Água, promovendo a utilização sustentável de água numa proteção a longo prazo dos recursos hídricos disponíveis, conforme os termos previstos na alínea b) do n.º 1 do artigo 1.º, nos artigos 7.º e 8.º e na alínea b) do n.º 1 do artigo 63.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro (Lei da Água), nas posteriores alterações, e de acordo com o Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Sado e Mira (PGRH do 3.º ciclo da RH5A), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros (RCM) n.º 52/2016, de 20 de setembro;
- A massa de água da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda permanece em situação crítica desde julho de 2022 e assim se mantem até setembro de 2025;
- Pelo que se considera, à luz do princípio da precaução e prevenção, previsto no artigo 89.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro (Lei da Água), apenas uma decisão desfavorável assegura a devida proteção do ambiente, da água e das populações.

5. PARECER

Sobre o EIA/Aditamento/Alegações ao projeto em sede de conformidade, para o projeto “Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo” em fase de projeto de execução:

- Ponderados os impactes negativos e perspetivados os impactes positivos identificados pela CA, para os fatores relevantes e determinantes para a decisão, atendendo à tipologia do projeto na localização pretendida;

- Os pareceres desfavoráveis do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas IP e da APA/Administração da Região Hidrográfica do Alentejo IP, associado este último ao fator Alterações Climáticas;
- O indicado nos Pareceres Externos;
- As participações recebidas em sede de Consulta Pública;
- Os antecedentes do procedimento de AIA do projeto, com a emissão de dois pareceres desfavoráveis à produção de pera-abacate para esta mesma localização, quer em 805,35 ha quer em 734,48 ha,

a CA propõe a emissão de Parecer Desfavorável, por considerar que, considerando os aspetos acima enumerados, não é possível minimizar e/ou compensar os impactes negativos expectáveis de significância elevada nos fatores identificados como relevantes à sustentabilidade do projeto, na localização pretendida.

6. ASSINATURAS

Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, IP

Assinado por: **MÁRIO JORGE VIDIGAL LOURIDO**
Num. de Identificação: 07008033
Data: 2025.11.12 16:18:57+00'00'

Mário Lourido Claudia Gonçalves Ana Pedrosa Paulo Ribeiro

APA/Administração da Região Hidrográfica do Alentejo, IP

Ana Gonçalves

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, IP

Sandro Nóbrega

Património Cultural, IP

João Marques

Agência para o Clima, IP

André Alves

Câmara Municipal de Alcácer do Sal

Joana Grilo

Mário Lourido

De: Cláudia Gonçalves <claudia.goncalves@drapalentejo.gov.pt>
Enviado: 7 de novembro de 2025 16:27
Para: Mário Lourido
Assunto: AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Dada a impossibilidade em assinar pessoalmente o Parecer Desfavorável da CA relativo ao projeto em epígrafe, e concordando-se com o mesmo, venho por este meio delegar a respetiva assinatura no coordenador dos trabalhos da Comissão de Avaliação, o Eng.º Mário Lourido.

Com os meus melhores cumprimentos,

Cláudia Gonçalves
Técnica Superior
Divisão da Reserva Agrícola Nacional, Recursos e Infraestruturas

Comissão de Coordenação e
Desenvolvimento Regional do Alentejo, I.P.
Av. Eng. Arantes e Oliveira, 193
7004-514 Évora, Portugal
Tel.: (+351) 266 740 300
email: geral@ccdr-a.gov.pt

www.ccdr-a.gov.pt

Delegação de Assinatura

Eu, Ana Maria Rosado de Amorim Pedrosa, na qualidade de representante da CCDR Alentejo venho por este meio delegar no Eng.º Mário Lourido a minha assinatura no parecer da Comissão de Avaliação do Estudo de Impacte Ambiental do Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo.

.

Évora, 06 de novembro 2025

Assinado por: **Ana Maria Rosado de Amorim Pedrosa**
Num. de Identificação: 06907341
Data: 2025.11.06 15:05:53+00'00'

CHAVE MÓVEL

Mário Lourido

De: mario.lourido@ccdr-a.gov.pt

De: Paulo Ribeiro <paulo.ribeiro@ccdr-a.gov.pt>
Enviada: 6 de novembro de 2025 15:03
Para: Mário Lourido <mario.lourido@ccdr-a.gov.pt>
Assunto: RE: AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Boa trade

Para efeitos de assinatura do Parecer Final da Comissão de Avaliação do procedimento supra identificado, com o qual se concorda, venho por este meio delegar a minha assinatura no Eng.º Mário Lourido, presidente da referida Comissão de Avaliação.

Paulo Ribeiro
Técnico Superior
Divisão de Ordenamento e Estratégia Territorial
E-mail: paulo.ribeiro@ccdr-a.gov.pt

Comissão de Coordenação e
Desenvolvimento Regional do Alentejo, I.P.
Av. Eng. Arantes e Oliveira, 193
7004-514 Évora, Portugal
Tel.: (+351) 266 740 300
email: geral@ccdr-a.gov.pt

www.ccdr-a.gov.pt

Assunto: AIA 565 PL 20250307002480
Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Proponente: Expoente Frugal, Lda.

Declaração: *Ilídio Ribeiro, Chefe da Divisão de Áreas Classificadas da DRCNF-Alentejo, vem por este meio delegar no Eng.º Mário Lourido, coordenador da Comissão de Avaliação, a assinatura no parecer da Comissão de Avaliação, face ao impedimento do Dr. Sandro Nóbrega, representante do ICNF/DRCNF-Alentejo na Comissão de Avaliação do EIA do "Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo", processo de AIA n.º 565 da CCDR Alentejo.*

Assinado por: **ILÍDIO ALBERTO MENDONÇA LOPES RIBEIRO**
Num. de Identificação: 08547708
Data: 2025.11.06 22:22:14+00'00'

Mário Lourido

De: Ana Gonçalves <ana.goncalves@apambiente.pt>
Enviado: 10 de novembro de 2025 16:57
Para: Mário Lourido
Assunto: Delegação de assinatura - AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Caro colega,

Após análise do Parecer da Comissão de Avaliação relativo ao procedimento de AIA n.º 565, "Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo", e por concordar com o seu conteúdo, venho, por este meio, delegar a no Eng.º Mário Lourido a assinatura do respetivo parecer.

Com os melhores cumprimentos,
Ana Rosária Gonçalves
Técnica Superior
Divisão de Planeamento e Informação
Administração de Região Hidrográfica do Alentejo



Av.ª Eng. Arantes e Oliveira, 193 – Évora
7004-514 Évora
(+351) 266768200
apambiente.pt

Proteja o ambiente. Pense se é mesmo necessário imprimir este email!

Mário Lourido

De: mario.lourido@ccdr-a.gov.pt
Assunto: FW: AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

---

De: André Alves <andre.alves@apclima.pt>
Enviada: 7 de novembro de 2025 15:28
Para: Mário Lourido <mario.lourido@ccdr-a.gov.pt>
Cc: Patricia Gama <patricia.gama@apclima.pt>; Ana Filipa Fernandes <anafilipa.fernandes@apclima.pt>; Paulo Ferreira Lourenço <paulo.lourenco@apclima.pt>
Assunto: RE: AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Caro Mário,

Após análise da proposta de Parecer da Comissão de Avaliação, considera-se que o mesmo reflete as apreciações anteriormente submetidas por este serviço no âmbito do descritor Alterações Climáticas, concordando-se com o restante conteúdo do mesmo.

Dada a impossibilidade, enquanto representante do DAC, de assinar o referido parecer referente ao procedimento em apreço, venho por este meio delegar a respetiva assinatura na coordenadora da Comissão de Avaliação Engº Mário Lourido.

Obrigado.
Cumprimentos,
André Alves
Técnico Superior - ApC, I.P

SEDE: PALACETE VILAR DE ALLEN
RUA ANTÓNIO CARDOSO, 175
4150-081 PORTO, PORTUGAL

GERAL@PATRIMONIOCULTURAL.GOV.PT
WWW.PATRIMONIOCULTURAL.GOV.PT

PALÁCIO NACIONAL DA AJUDA
LARGO DA AJUDA
1349-021 LISBOA, PORTUGAL

T. +351 226 000 454
T. +351 213 614 200

PATRIMÓNIO CULTURAL

DECLARAÇÃO

Na impossibilidade do Doutor João António Ferreira Marques, representante do PC, IP na Comissão de Avaliação do projeto – "AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo", estar presente na assinatura do referido parecer, vimos por este meio delegar a sua assinatura na pessoa do coordenador da Ca, Eng.º Mário Lourido, da CCDR Alentejo.

Lisboa, 6 de novembro de 2025

Assinado por: **ANA SOFIA BRÁS GOMES**
Num. de Identificação: 10507679
Data: 2025.11.06 15:30:35+00'00'

CARTÃO DE CIDADÃO

P'la

Ana Catarina Sousa
Vice-Presidente

Mário Lourido

De: mario.lourido@ccdr-a.gov.pt
Assunto: FW: AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

---

De: Joana Grilo <joana.grilo@m-alcacerdosal.pt>
Enviada: 10 de novembro de 2025 14:39
Para: Mário Lourido <mario.lourido@ccdr-a.gov.pt>; 'Ana Gonçalves' <ana.goncalves@apambiente.pt>
Cc: Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>; Ricardo Ambrosio <ricardo.ambrosio@m-alcacerdosal.pt>
Assunto: RE: AIA 565 PL 20250307002480 - Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Boa tarde,

Na sequência do mail enviado, o Município de Alcácer do Sal concorda com o teor do Parecer da CA.
Contudo dada a impossibilidade de me deslocar à CCDR-Alentejo, delego no Eng.º Mário Lourido a assinatura do Parecer da Comissão de Avaliação.

Com os melhores cumprimentos
Joana Grilo - Arq.ª Paisagista

Município de Alcácer do Sal
Divisão de Planeamento e Gestão Urbanística
Gabinete Técnico - Setor de Licenciamento

Joana Grilo
Arquitetura Paisagista
Setor de Licenciamentos | DPGU

CMAS - Praça Pedro Nunes

7580-125 Alcácer do Sal

265610040 Ext:
joana.grilo@m-alcacerdosal.pt
cm-alcacerdosal.pt

Anexo 1.3 – Aceitação da reformulação do projeto, nos termos previstos no artigo 16.º do RJAIA

De: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>
Enviada: 20 de novembro de 2025 16:48
Para: Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>; jose.e.martins@abreuadvogados.com; guilherme.m.silva@abreuadvogados.com; Gonzalo Roca <gonzalo.roca@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Cara Eng.ª Maria José Santana,

Agradecemos o seu e-mail, o qual mereceu a nossa melhor atenção.

Informo que concordamos em dar início ao processo de reformulação do projeto, nos termos previstos no artigo 16.º do RJAIA.

Considerando o desfecho do anterior procedimento de AIA, entendemos ser oportuno propor que todas as reuniões a realizar no âmbito do presente artigo 16.º decorram nas instalações da CCDR, com a presença das duas entidades que emitiram parecer desfavorável — o ICNF e a ARH — de modo a garantir uma articulação mais eficaz entre todas as partes intervenientes.

Acreditamos que esta abordagem permitirá garantir que a CCDR disponha, no final do procedimento, de todos os elementos indispensáveis à emissão do respetivo parecer.

Atendendo à disponibilidade entretanto manifestada pela ARH, propomos que a primeira reunião seja agendada para dia 27 ou 28 de novembro, em horário a definir.

Com os melhores cumprimentos,

Afonso Cuco

AQUATERRA

Afonso Cuco
TLM. (+351) 912 432 426
Alfrapark
Edifício G – 3º piso
2610-008 Alfragide
aquaterra.farm

De: Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>
Enviada: 20 de novembro de 2025 15:04
Para: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>; jose.e.martins@abreuadvogados.com; guilherme.m.silva@abreuadvogados.com; Gonzalo Roca <gonzalo.roca@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Exmo. Sr. Dr. Afonso Cuco:

Relativamente à reunião solicitada, informo da indisponibilidade do sr. diretor regional do ICNF em reunir nas datas em avaliação (até dia 25), encontrando-se disponível para uma reunião a realizar posteriormente no ICNF, já em fase de aplicação do artigo 16º, juntando os técnicos envolvidos no processo.
Quanto à APA/ARH, só terá disponibilidade para reunir depois de dia 26 de novembro.
Desta forma, sugere-se a V. Exa. que sejam posteriormente agendadas as reuniões diretamente com as entidades referidas, para tratar dos assuntos setoriais da competência das mesmas, sem a intervenção desta CCDR, IP, caso ainda entendam necessária a sua realização.

Com os melhores cumprimentos.

Maria José Delmas Santana
Diretora de Serviços
Unidade de Ambiente, Conservação da Natureza e Biodiversidade

CCDR ALENTEJO I.P.

Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, I.P.

Av. Eng. Arantes e Oliveira, 193
7004-514 Évora, Portugal
Tel.: (+351) 266 740 300
email: geral@ccdr-a.gov.pt

www.ccdr-a.gov.pt

De: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>
Enviada: 17 de novembro de 2025 16:56
Para: Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>; CCDR Alentejo / DSA <dsa@ccdr-a.gov.pt>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>; jose.e.martins@abreuadvogados.com; guilherme.m.silva@abreuadvogados.com; Gonzalo Roca <gonzalo.roca@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Cara Eng.ª Maria José Santana,

Acuso a receção do esclarecimento prestado, que muito agradeço, bem como a confirmação relativa ao pedido de prorrogação do prazo.

Conforme oportunamente falado por telefone, agradeço que diligenciem no sentido de assegurar o agendamento da reunião até dia 25.

Com os melhores cumprimentos,
Afonso Cuco

AQUATERRA

Afonso Cuco
TLM. (+351) 912 432 426
Alfrapark
Edifício G – 3º piso
2610-008 Alfragide
aquaterra.farm

De: Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>
Enviada: 17 de novembro de 2025 16:06
Para: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>; CCDR Alentejo / DSA <dsa@ccdr-a.gov.pt>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>; jose.e.martins@abreuadvogados.com; guilherme.m.silva@abreuadvogados.com; Gonzalo Roca <gonzalo.roca@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Dr. Afonso Cuco:

Julgo ter havido uma interpretação incorreta da data em que seria possível reunir: **só depois de dia 20** será possível combinar uma data com a APA/ARHA, pelo que será mais plausível pensar na possibilidade de reunir na próxima semana (em dia ainda não definido). Por esta razão, apesar de nada haver a opor quanto à prorrogação do prazo de resposta por mais 3 dias, não é garantido que esse período consiga "abarcar" a realização da reunião solicitada.

Com os melhores cumprimentos.

Maria José Delmas Santana
Diretora de Serviços
Unidade de Ambiente, Conservação da Natureza e Biodiversidade

Comissão de Coordenação e
Desenvolvimento Regional do Alentejo, I.P.
Av. Eng. Arantes e Oliveira, 193
7004-514 Évora, Portugal
Tel.: (+351) 266 740 300
email: geral@ccdr-a.gov.pt

www.ccdr-a.gov.pt

De: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>
Enviada: 17 de novembro de 2025 14:45
Para: Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>; CCDR Alentejo / DSA <dsa@ccdr-a.gov.pt>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>; jose.e.martins@abreuadvogados.com; guilherme.m.silva@abreuadvogados.com; Gonzalo Roca <gonzalo.roca@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Cara Eng.ª Maria José Santana, boa tarde

Teve oportunidade de analisar o nosso pedido?

Com os melhores cumprimentos,
Afonso Cuco

Afonso Cuco
TLM. (+351) 912 432 426
Alfrapark
Edifício G – 3º piso
2610-008 Alfragide
aquaterra.farm

De: Afonso Cuco
Enviada: 14 de novembro de 2025 17:20
Para: 'Maria José Santana' <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>; CCDR Alentejo / DSA <dsa@ccdr-a.gov.pt>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>; jose.e.martins@abreuadvogados.com; guilherme.m.silva@abreuadvogados.com; Gonzalo Roca <gonzalo.roca@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#
Importância: Alta

Cara Eng.ª Maria José Santana,

Atendendo ao exposto, confirmamos a nossa disponibilidade para reunir no próximo dia 20 de novembro, em hora a definir.

Considerando a importância desta reunião para o cabal esclarecimento das diversas questões suscitadas no parecer da Comissão de Avaliação, as quais se revelam determinantes para a decisão relativa à eventual reformulação do projeto ao abrigo do artigo 16.º, n.º 2, do RJAIA, vimos igualmente solicitar a concessão de um prazo adicional de 3 dias, a acrescer ao prazo de 5 dias estabelecido no V/Ofício com a Ref.ª S06762-2025-UACNB/DAA.

Ficamos a aguardar a confirmação da hora da reunião, bem como a confirmação relativa ao pedido agora apresentado.

Com os melhores cumprimentos,
Afonso Cuco

Afonso Cuco
TLM. (+351) 912 432 426
Alfrapark
Edifício G – 3º piso
2610-008 Alfragide
aquaterra.farm

De: Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>
Enviada: 14 de novembro de 2025 15:53
Para: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>; CCDR Alentejo / DSA <dsa@ccdr-a.gov.pt>

Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Ex.mos Srs:

Dada a exígua antecedência com que esta reunião foi solicitada (que inclusivamente solicita a presença de diretores regionais de outros organismos que não a CCDRA), informa-se que, da nossa parte, não é possível reunir nas datas indicadas.
Caso se mantenha o interesse na reunião, procuraremos indicar uma data consentânea para todos os intervenientes solicitados, sendo que, da parte da APA/ARHA, por ausência fora do país do respetivo administrador, tal só poderá ocorrer depois de dia 20; até ao momento, aguardamos informação sobre a disponibilidade do ICNF.

Com os melhores cumprimentos.

Maria José Delmas Santana
Diretora de Serviços
Unidade de Ambiente, Conservação da Natureza e Biodiversidade

Comissão de Coordenação e
Desenvolvimento Regional do Alentejo, I.P.
Av. Eng. Arantes e Oliveira, 193
7004-514 Évora, Portugal
Tel.: (+351) 266 740 300
email: geral@ccdr-a.gov.pt

www.ccdr-a.gov.pt

De: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>
Enviada: 14 de novembro de 2025 11:16
Para: CCDR Alentejo / DSA <dsa@ccdr-a.gov.pt>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Exmos. Senhores,

Em complemento do meu e-mail *infra*, venho solicitar o agendamento de reunião com carácter de urgência, a realizar-se na próxima segunda-feira ou terça de manhã.

Atendendo ao conteúdo do parecer da Comissão de Avaliação, é fundamental que estejam também presentes na reunião os diretores regionais da ARH e ICNF.

Agradecemos a confirmação da vossa disponibilidade com a maior brevidade possível.

Com os melhores cumprimentos,
Afonso Cuco

Afonso Cuco
TLM. (+351) 912 432 426
Alfrapark
Edifício G – 3º piso
2610-008 Alfragide
aquaterra.farm

De: Afonso Cuco
Enviada: 14 de novembro de 2025 09:56
Para: 'CCDR Alentejo / DSA' <dsa@ccdr-a.gov.pt>
Cc: José Domingos Velez <jose.velez@ccdr-a.gov.pt>; Maria José Santana <mj.santana@ccdr-a.gov.pt>; Cristina Martins <cristina.martins@ccdr-a.gov.pt>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>
Assunto: RE: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA #PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Exmos. Senhores,

Após análise da documentação anexa ao vosso ofício, verificámos a ausência dos pareceres setoriais emitidos pelas diversas entidades que integram a Comissão de Avaliação, bem como dos pareceres solicitados a entidades externas.

Assim, solicitamos a partilha, por e-mail, dos referidos pareceres com a máxima urgência.

Com os melhores cumprimentos,
Afonso Cuco

Afonso Cuco
TLM. (+351) 912 432 426
Alfrapark
Edifício G – 3º piso
2610-008 Alfragide
aquaterra.farm

De: CCDR Alentejo / DSA <dsa@ccdr-a.gov.pt>
Enviada: 13 de novembro de 2025 15:57
Para: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>; Admin <admin@aquaterra.farm>
Assunto: Processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) n.º 565 CCDRA IP - Projeto: Agroflorestal das Herdades

de Murta e Monte Novo - Proponente: Expoente Frugal, Lda - Nº S06762-2025-UACNB/DAA
#PROC:450.10.229.02.00017.2025#

Encarrega-me o Vice-Presidente, Eng.º José Domingos Velez, de enviar a V. Exª a documentação em anexo sobre o assunto em epígrafe

Com os melhores cumprimentos,

Balbina Crespo Zambujo
Secretariado
Unidade de Ambiente, Conservação da Natureza e Biodiversidade
E-mail: balbina.zambujo@ccdr-a.gov.pt

CCDR ALENTEJO I.P.

Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo, I.P.
Av. Eng. Arantes e Oliveira, 193
7004-514 Évora, Portugal
Tel.: (+351) 266 740 300
email: geral@ccdr-a.gov.pt

www.ccdr-a.gov.pt

Anexo 1.4 – Ações UOG – Plano de Gestão Florestal

Unidades de Gestão	Área (ha)	Função com base no PROF-Alentejo	Função com base no PDM e Rede Natura 2000	Produção florestal - ações	Habitats	Conservação e promoção da biodiversidade - Ações - Medidas de Minimização do EIA	Objetivos de conservação	Quantificação de áreas (ha)	Calendarização
B.1.1 - Povoamento puro de Pb com Pm disperso e Sb muito disperso	**545,98**	Produção de madeira Produção de cortiça Produção de fruto Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Conservação dos recursos genéticos Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Produção florestal; Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Correção de densidade excessiva de Pinheiro bravo - Destroçamento de sobrantes - Poda sanitária - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para nemátodo - Instalação de armadilhas para processionária (Páginas 81-83)	2260 6310 2150* 2250* 2250*+2150* 2250*+2260 2250*+2260+2150* 2250*+2260+2330 2250*+2330 2260+2150*+2250* 2260+2250*	- **Garantir a desmatação mínima**, apenas em faixas ou manchas. Esta ação será efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural, para que sejam preservadas as **funções de proteção do solo e fixação dunar**; - **Controlar a flora alóctone** somente com recurso a maquinaria moto manual; - **Sinalizar os núcleos de vegetação prioritários** a preservar, antes de realizar qualquer intervenção florestal; - **Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível**: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a **garantir a irregularidade do mosaico arbustivo** e permitir a **renovação do banco de sementes** das espécies autóctones; - Nas áreas de ocorrência de **Armeria rouyana, Thymus capitellatus e Santolina impressa**, os **ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos**, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho. A normal evolução da vegetação nesta parcela poderá fazer ocorrer novos núcleos de espécies prioritárias/protegidas, às quais se devem atender as mesmas ações que as agora propostas para as áreas com espécies prioritárias/protegidas.	Manutenção de habitats e flora RELAPE e Elevação do estado de conservação dos habitats	545,98	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
						FE2. **Gestão seletiva dos matos** de toda a zona florestal do projeto, nomeadamente a Área a Florestal e a área denominada Floresta de Produção e Matos, de forma a preservar as espécies com elevado interesse para a conservação, a não condicionar o seu desenvolvimento e a promover o aparecimento de zonas de maior densidade	Manutenção de habitats e flora RELAPE	1443,22	2026-2042
						FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	545,98	2026-2042
						FE7. Prever ainda a **conservação e valorização de habitats prioritários já identificados (2150* e 2250*)** - a aplicar nos núcleos anteriormente sinalizados e já com sementeiras realizadas. No âmbito das ações de conservação da biodiversidade, temos dois conceitos atingido por via das seguintes ações: o termo "conservação" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área a delimitar com estacas madeira de 1,0 m de altura espaçadas de 10 m em 10 m, para que não ocorra perturbação aos valores a preservar; o termo "valorização" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área delimitada, e inclui a colocação de placas informativas para proteção dos valores e para educação ambiental dos intervenientes do projeto;	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	183,99	2026-2042
						FE9. **Criação de locais de alimentação para vários grupos de fauna**, através da implementação de faixas de sementeira de cereais/gramíneas, constituídas por leguminosas anuais de ressementeira natural e/ou leguminosas e gramíneas perenes	Promoção de biodiversidade	2,27	2026/2027
						Medida adicional para cumprimento do objetivo de conservação do Plano de Gestão da ZEC Comporta-Galé "melhorar o estado de conservação do habitat 2260", através da conservação das espécies características do habitat 2260 – Stauracanthus genistoides, Halimium halimifolium, Halimium calycinum, Calluna vulgaris, já identificadas na área de estudo, nas Zonas de Valorização e Recuperação (271,66 hectares), especialmente criadas para esse efeito. o Serão recolhidas sementes e/ou serão transplantados indivíduos destas espécies na área de implantação do projeto agrícola, previamente à fase de construção; o Serão efetuadas sementeiras, ou plantações por estacaria, durante os meses de outubro ou novembro, em função da espécie; o Posteriormente, nas Zonas de Valorização e Recuperação: ☐ delimitação das sementeiras realizadas; ☐ proibição da circulação de viaturas; ☐ condicionamento da intervenção e/ou realização de gestão seletiva de matos, conforme estabelecido no PGF.	Elevação do estado de conservação do habitat 2260	166,38	2026-2042
B.1.2 - Povoamento puro de Pb	**8,9**	Produção de madeira Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida	Produção florestal; Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Correção de densidade excessiva de Pinheiro bravo - Destroçamento de sobrantes - Poda sanitária - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para nemátodo - Instalação de armadilhas para processionária (Páginas 84-85)	2260 2150*	- **Garantir a desmatação mínima**, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as **funções de proteção do solo e fixação dunar**; - **Controlar a flora alóctone** somente com recurso a maquinaria moto manual; - **Sinalizar os núcleos de vegetação prioritários** a preservar, antes de realizar qualquer intervenção florestal; - **Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível**: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a **garantir a irregularidade do mosaico arbustivo** e permitir a **renovação do banco de sementes** das espécies autóctones; - **Promover práticas ligeiras de mobilização do substrato**	Manutenção de habitats e flora RELAPE e Elevação do estado de conservação dos habitats	8,9	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
						FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	8,9	2026-2042
						FE7. Prever ainda a **conservação e valorização de habitats prioritários já identificados (2150* e 2250*)** - a aplicar nos núcleos anteriormente sinalizados e já com sementeiras realizadas. No âmbito das ações de conservação da biodiversidade, temos dois conceitos atingido por via das seguintes ações: o termo "conservação" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área a delimitar com estacas madeira de 1,0 m de altura espaçadas de 10 m em 10 m, para que não ocorra perturbação aos valores a preservar; o termo "valorização" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área delimitada, e inclui a colocação de placas informativas para proteção dos valores e para educação ambiental dos intervenientes do projeto;	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	0,035	2026-2042
B.2.1 - Povoamento puro de Pm (plantação)	**254,31**	Produção de fruto Produção de madeira Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Conservação dos recursos genéticos	Produção florestal; Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Desbaste - Restauração da fertilidade do solo - Desramação - Destroçamento de sobrantes - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para processionária - Instalação de armadilhas para nemátodo (Páginas 86-87)	2260 2150* 2250*	- Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as **funções de proteção do solo e fixação dunar**; - **Controlar a flora alóctone** somente com recurso a maquinaria moto manual; - **Sinalizar os núcleos de vegetação prioritários** a preservar, antes de realizar qualquer intervenção florestal; - **Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível**: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a **irregularidade do mosaico arbustivo** e permitir a **renovação do banco de sementes** das espécies autóctones.	Manutenção de habitats e flora RELAPE e Elevação do estado de conservação dos habitats	254,31	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
						FE2. **Gestão seletiva dos matos** de toda a zona florestal do projeto, nomeadamente a Área a Florestal e a área denominada Floresta de Produção e Matos, de forma a preservar as espécies com elevado interesse para a conservação, a não condicionar o seu desenvolvimento e a promover o aparecimento de zonas de maior densidade	Manutenção de habitats e flora RELAPE	1443,22	2026-2042
						FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	254,31	2026-2042
						FE7. Prever ainda a **conservação e valorização de habitats prioritários já identificados (2150* e 2250*)** - a aplicar nos núcleos anteriormente sinalizados e já com sementeiras realizadas. No âmbito das ações de conservação da biodiversidade, temos dois conceitos atingido por via das seguintes ações: o termo "conservação" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área a delimitar com estacas madeira de 1,0 m de altura espaçadas de 10 m em 10 m, para que não ocorra perturbação aos valores a preservar; o termo "valorização" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área delimitada, e inclui a colocação de placas informativas para proteção dos valores e para educação ambiental dos intervenientes do projeto;	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	9,84	2026-2042
						FE9. **Criação de locais de alimentação para vários grupos de fauna**, através da implementação de faixas de sementeira de cereais/gramíneas, constituídas por leguminosas anuais de ressementeira natural e/ou leguminosas e gramíneas perenes	Promoção de biodiversidade	0,99	2026/2027
						Medida adicional para cumprimento do objetivo de conservação do Plano de Gestão da ZEC Comporta-Galé "melhorar o estado de conservação do habitat 2260", através da conservação das espécies características do habitat 2260 – Stauracanthus genistoides, Halimium halimifolium, Halimium calycinum, Calluna vulgaris, já identificadas na área de estudo, nas Zonas de Valorização e Recuperação (271,66 hectares), especialmente criadas para esse efeito. o Serão recolhidas sementes e/ou serão transplantados indivíduos destas espécies na área de implantação do projeto agrícola, previamente à fase de construção; o Serão efetuadas sementeiras, ou plantações por estacaria, durante os meses de outubro ou novembro, em função da espécie; o Posteriormente, nas Zonas de Valorização e Recuperação: ☐ delimitação das sementeiras realizadas; ☐ proibição da circulação de viaturas; ☐ condicionamento da intervenção e/ou realização de gestão seletiva de matos, conforme estabelecido no PGF.	Elevação do estado de conservação do habitat 2260	9,6	2026-2042
B.2.2 - Povoamento puro de Pm (plantação)	**135,38**	Produção de fruto Produção de madeira Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Produção florestal; Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Desbaste - Restauração da fertilidade do solo - Desramação - Destroçamento de sobrantes - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para processionária - Instalação de armadilhas para nemátodo (Páginas 88-89)	2260 6310 2150* 2150*+2250* 2250* 2250*+2260	- Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as **funções de proteção do solo e fixação dunar**; - **Controlar a flora alóctone** somente com recurso a maquinaria moto manual; - **Sinalizar os núcleos de vegetação prioritários** a preservar, antes de realizar qualquer intervenção florestal; - **Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível**: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a **garantir a irregularidade do mosaico arbustivo** e permitir a **renovação do banco de sementes** das espécies autóctones; - Nas áreas de ocorrência de **Armeria rouyana, Thymus capitellatus e Santolina impressa**, os **ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos**, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho. A normal evolução da vegetação nesta parcela poderá fazer ocorrer novos núcleos de espécies prioritárias/protegidas, às quais se devem atender as mesmas ações que as agora propostas para as áreas com espécies prioritárias/protegidas.	Promoção de biodiversidade e Elevação do estado de conservação por controlo de exóticas	135,38	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
						FE2. **Gestão seletiva dos matos** de toda a zona florestal do projeto, nomeadamente a Área a Florestal e a área denominada Floresta de Produção e Matos, de forma a preservar as espécies com elevado interesse para a conservação, a não condicionar o seu desenvolvimento e a promover o aparecimento de zonas de maior densidade	Manutenção de habitats e flora RELAPE	1443,22	2026-2042
						FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	135,38	2026-2042
						FE6. Promover a **recuperação e valorização ecológica da zona do Açude da Murta** e zonas envolventes. Após a aprovação do reperfilamento da linha de água pela APA, deverá ser entregue no ICNF o projeto de restauro do Açude da Murta, a começar pelo controlo de espécies exóticas invasoras. Este projeto deverá contemplar a galeria ripícola da linha de água que se pretende que constitua corredor ecológico fluvial;	Elevação do estado de conservação de habitats e Manutenção de biótopos	12,52	2026-2042
						FE7. Prever ainda a **conservação e valorização de habitats prioritários já identificados (2150* e 2250*)** - a aplicar nos núcleos anteriormente sinalizados e já com sementeiras realizadas. No âmbito das ações de conservação da biodiversidade, temos dois conceitos atingido por via das seguintes ações: o termo "conservação" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área a delimitar com estacas madeira de 1,0 m de altura espaçadas de 10 m em 10 m, para que não ocorra perturbação aos valores a preservar; o termo "valorização" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área delimitada, e inclui a colocação de placas informativas para proteção dos valores e para educação ambiental dos intervenientes do projeto;	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	4,99	2026-2042
						Medida adicional para cumprimento do objetivo de conservação do Plano de Gestão da ZEC Comporta-Galé "melhorar o estado de conservação do habitat 2260", através da conservação das espécies características do habitat 2260 – Stauracanthus genistoides, Halimium halimifolium, Halimium calycinum, Calluna vulgaris, já identificadas na área de estudo, nas Zonas de Valorização e Recuperação (271,66 hectares), especialmente criadas para esse efeito. o Serão recolhidas sementes e/ou serão transplantados indivíduos destas espécies na área de implantação do projeto agrícola, previamente à fase de construção; o Serão efetuadas sementeiras, ou plantações por estacaria, durante os meses de outubro ou novembro, em função da espécie; o Posteriormente, nas Zonas de Valorização e Recuperação: ☐ delimitação das sementeiras realizadas; ☐ proibição da circulação de viaturas; ☐ condicionamento da intervenção e/ou realização de gestão seletiva de matos, conforme estabelecido no PGF.	Elevação do estado de conservação do habitat 2260	12,52	2026-2042
B.2.3 - Povoamento puro de Pm jovem (plantação)	**5,59**	Produção de fruto Produção de madeira Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Produção florestal; Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Desbaste - Restauração da fertilidade do solo - Desramação - Destroçamento de sobrantes - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para Processionária - Instalação de armadilhas para Nemátodo (Página 90)	2260	FE6. Promover a **recuperação e valorização ecológica da zona do Açude da Murta** e zonas envolventes. Após a aprovação do reperfilamento da linha de água pela APA, deverá ser entregue no ICNF o projeto de restauro do Açude da Murta, a começar pelo controlo de espécies exóticas invasoras. Este projeto deverá contemplar a galeria ripícola da linha de água que se pretende que constitua corredor ecológico fluvial;	Elevação do estado de conservação de habitats e Manutenção de biótopos	5,59	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
B.3.1 - Povoamento misto de Pb com Pm e Sb Ac e Ec disperso	**86,21**	Produção de madeira Produção de cortiça Conservação de habitats classificados Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Produção florestal; Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Correção de densidade excessiva de Pinheiro bravo - Desbaste - Restauração da fertilidade do solo - Poda de formação de sobreiro - Destroçamento de sobrantes - Controlo de espécies invasoras - Poda sanitária - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para Processionária - Instalação de armadilhas para Plátipo - Instalação de armadilhas para Nemátodo (Páginas 91-93)	2260 6310 2150* 2250* 6310+2150* 6310+2260	- **Garantir a desmatação mínima**, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as **funções de proteção do solo e fixação dunar**; - **Controlar a flora alóctone** somente com recurso a maquinaria moto manual; - **Sinalizar os núcleos de vegetação prioritários** a preservar, antes de realizar qualquer intervenção florestal; - **Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível**: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a **garantir a irregularidade do mosaico arbustivo** e permitir a **renovação do banco de sementes** das espécies autóctones;	Manutenção de habitats e flora RELAPE e Elevação do estado de conservação dos habitats	86,21	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
						FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	86,21	Sempre que necessário
C.1.1 - Galeria Ripícola	**4,53**	Proteção da rede hidrográfica Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Conservação dos recursos genéticos	Promoção e conservação da biodiversidade	-	2260 6310 2250*	FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	4,53	2026-2042
D.1.1 - Área a converter para cultura agrícola	**302,91**	Produção de madeira Produção de fruto Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Produção florestal; Promoção e conservação da biodiversidade	- Remoção de cepos - Poda sanitária - Abate sanitário - Corte de Pinheiro manso - Corte de Pinheiro bravo (Página 94)	2260 2250*	**Manter o enrelvamento espontâneo nas zonas de entrelinhas de plantação**.	Manutenção de biótopos	Entrelinhas de plantação	2026-2042
						FP3. **Os núcleos das espécies** Armeria rouyana*, Thymus capitellatus e Santolina impressa **que foram inventariados na área de intervenção prevista** (setores agrícolas e infraestruturas de apoio ao projeto) **deverão ser de imediato delimitados com fita sinalizadora e só deverão ser retiradas após a colheita dos seus propágulos/sementes**			2026/2027
						FP8. **As sementes** das espécies Armeria rouyana*, Thymus capitellatus e Santolina impressa, **recolhidas na área de implantação dos setores agrícolas e das infraestruturas de apoio deverão ser distribuídas nas Zonas de Valorização e Recuperação, em especial na Zona VR1** (ver Desenho n.º 9.1 apresentado no Volume 2/3 – Peças Desenhadas), de forma a manter extensas áreas de conservação e restauro ecológico em mosaico e criar corredores ecológicos e continuidade funcional do território	Manutenção de biótopos	302,91	2026/2027
						FP9. **Implementação de cobertura herbácea permanente mediterrânica multifuncional com gramíneas, leguminosas e espécies autóctones associadas ao habitat 2260 na entrelinha de plantação**. Esta medida visa assegurar a cobertura permanente da entrelinha através de uma mistura de gramíneas e leguminosas, na qual serão integradas sementes das espécies companheiras do habitat 2260 (Thymus capitellatus, Halimium calycinum e Lavandula pedunculata), identificadas na área florestal correspondente às áreas de Floresta de Produção e Matos (1443,22 ha). A implementação desta medida pretende garantir a manutenção de um banco de sementes das espécies companheiras do habitat 2260 ao longo da vida útil do projeto, promovendo a recuperação futura deste habitat após a eventual desativação da exploração. Simultaneamente, a cobertura herbácea permanente permitirá manter o solo protegido, contribuindo para a redução da erosão, diminuição do sobreaquecimento superficial do solo, aumento da infiltração e melhoria da funcionalidade ecológica da entrelinha. Adicionalmente, **serão realizadas sementeiras destas espécies nos taludes dos reservatórios**, reforçando a integração ecológica e a conectividade das áreas intervencionadas.	Manutenção de biótopos e criação de um banco de sementes	Entrelinhas de plantação e taludes dos reservatórios	2026/2027
						FE12. **Prevenção da colisão de aves noturnas com as pás dos ventiladores antigeada**, através da desmobilização das pás dos ventiladores entre abril e novembro	Prevenção da mortalidade de avifauna noturna	Nos ventiladores antigeada	2026/2027
E.1.1 - Área de matos com Pb e Pm disperso	**573,55**	Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Conservação dos recursos genéticos Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Restauração da fertilidade do solo - Desramação - Destroçamento de sobrantes - Poda sanitária - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para nemátodo - Instalação de armadilhas para processionária (Páginas 95-96)	2260 2150* 2150*+2250* 2250* 2250*+2150* 2260+2150*+2250* 2260+2250*	- **Garantir a desmatação mínima**, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as **funções de proteção do solo e fixação dunar**; - **Controlar a flora alóctone** somente com recurso a maquinaria moto manual; - **Sinalizar os núcleos de vegetação prioritários** a preservar, antes de realizar qualquer intervenção florestal; - **Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível**: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a **garantir a irregularidade do mosaico arbustivo** e permitir a **renovação do banco de sementes** das espécies autóctones; - Nas áreas de ocorrência de **Armeria rouyana, Thymus capitellatus e Santolina impressa**, os **ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos**, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho. A normal evolução da vegetação nesta parcela poderá fazer ocorrer novos núcleos de espécies prioritárias/protegidas, às quais se devem atender as mesmas ações que as agora propostas para as áreas com espécies prioritárias/protegidas.	Manutenção de habitats e flora RELAPE e Elevação do estado de conservação dos habitats	573,55	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
						FP8. **As sementes** das espécies Armeria rouyana*, Thymus capitellatus e Santolina impressa, **recolhidas na área de implantação dos setores agrícolas e das infraestruturas de apoio deverão ser distribuídas nas Zonas de Valorização e Recuperação, em especial na Zona VR1** (ver Desenho n.º 9.1 apresentado no Volume 2/3 – Peças Desenhadas), de forma a manter extensas áreas de conservação e restauro ecológico em mosaico e criar corredores ecológicos e continuidade funcional do território	Promoção de flora com elevado valor de conservação	10,2	2026/2027
						FE2. **Gestão seletiva dos matos** de toda a zona florestal do projeto, nomeadamente a Área a Florestal e a área denominada Floresta de Produção e Matos, de forma a preservar as espécies com elevado interesse para a conservação, a não condicionar o seu desenvolvimento e a promover o aparecimento de zonas de maior densidade	Manutenção de habitats e flora RELAPE	1443,22	2026-2042
						FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	573,55	2026-2042
						FE6. Promover a **recuperação e valorização ecológica da zona do Açude da Murta** e zonas envolventes. Após a aprovação do reperfilamento da linha de água pela APA, deverá ser entregue no ICNF o projeto de restauro do Açude da Murta, a começar pelo controlo de espécies exóticas invasoras. Este projeto deverá contemplar a galeria ripícola da linha de água que se pretende que constitua corredor ecológico fluvial;	Elevação do estado de conservação de habitats e Manutenção de biótopos	28,7	2026-2042
						FE7. Prever ainda a **conservação e valorização de habitats prioritários já identificados (2150* e 2250*)** - a aplicar nos núcleos anteriormente sinalizados e já com sementeiras realizadas. No âmbito das ações de conservação da biodiversidade, temos dois conceitos atingido por via das seguintes ações: o termo "conservação" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área a delimitar com estacas madeira de 1,0 m de altura espaçadas de 10 m em 10 m, para que não ocorra perturbação aos valores a preservar; o termo "valorização" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área delimitada, e inclui a colocação de placas informativas para proteção dos valores e para educação ambiental dos intervenientes do projeto;	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	98,76	2026-2042
						FE9. **Criação de locais de alimentação para vários grupos de fauna**, através da implementação de faixas de sementeira de cereais/gramíneas, constituídas por leguminosas anuais de ressementeira natural e/ou leguminosas e gramíneas perenes	Promoção de biodiversidade	1,28	2026/2027
						FE10. **Promover o estabelecimento de espécies de fauna através da implementação de abrigos/locais de refúgio**, nomeadamente a implementação de caixas-ninho para aves insetívoras e morcegos na zona a oeste do Açude da Murta, bem como a implementação de amontoados de pedras para refúgio de mamofauna, herpetofauna e avifauna	Promoção de biodiversidade	4 locais de refúgio = 4 x 0,031 ha	2026/2027
						Medida adicional de densificação dos núcleos de flora com elevado valor de conservação (tais como Armeria rouyana, Thymus capitellatus e Santolina impressa) na Zona de Valorização e Recuperação n.º VR1 (ver Desenho n.º 9.1 apresentado no Volume 2/3 – Peças Desenhadas). Esta zona já apresenta uma elevada densidade de flora RELAPE, pelo que se propõe realizar sementeiras, para constituírem um banco de sementes	Promoção de flora com elevado valor de conservação	10,2	2026/2027
E.2.1 - Área de matos com Pm disperso	**116,8**	Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Promoção e conservação da biodiversidade	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Restauração da fertilidade do solo - Desramação - Desbaste - Destroçamento de sobrantes - Abate sanitário - Instalação de armadilhas para nemátodo (Páginas 97-98)	2260 2150* 2250* 2250*+2150* 2250*+2260 2250*+2260+2330	- **Garantir a desmatação mínima**, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as **funções de proteção do solo e fixação dunar**; - **Controlar a flora alóctone** somente com recurso a maquinaria moto manual; - **Sinalizar os núcleos de vegetação prioritários** a preservar, antes de realizar qualquer intervenção florestal; - **Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível**: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a **garantir a irregularidade do mosaico arbustivo** e permitir a **renovação do banco de sementes** das espécies autóctones.	Manutenção de habitats e flora RELAPE e Elevação do estado de conservação dos habitats	116,8	2026-2042 (até ao quarto quinquénio)
						FE2. **Gestão seletiva dos matos** de toda a zona florestal do projeto, nomeadamente a Área a Florestal e a área denominada Floresta de Produção e Matos, de forma a preservar as espécies com elevado interesse para a conservação, a não condicionar o seu desenvolvimento e a promover o aparecimento de zonas de maior densidade	Manutenção de habitats e flora RELAPE	1443,22	2026-2042
						FE3. **Ações de controlo e erradicação das espécies exóticas invasoras** identificadas na área de estudo, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	116,8	2026-2042
						FE7. Prever ainda a **conservação e valorização de habitats prioritários já identificados (2150* e 2250*)** - a aplicar nos núcleos anteriormente sinalizados e já com sementeiras realizadas. No âmbito das ações de conservação da biodiversidade, temos dois conceitos atingido por via das seguintes ações: o termo "conservação" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área a delimitar com estacas madeira de 1,0 m de altura espaçadas de 10 m em 10 m, para que não ocorra perturbação aos valores a preservar; o termo "valorização" refere-se a sinalização, delimitação e proibição de circulação na área delimitada, e inclui a colocação de placas informativas para proteção dos valores e para educação ambiental dos intervenientes do projeto;	Manutenção e Elevação do estado de conservação de habitats	12,31	2026-2042
						Medida adicional para cumprimento do objetivo de conservação do Plano de Gestão da ZEC Comporta-Galé "melhorar o estado de conservação do habitat 2260", através da conservação das espécies características do habitat 2260 – Stauracanthus genistoides, Halimium halimifolium, Halimium calycinum, Calluna vulgaris, já identificadas na área de estudo, nas Zonas de Valorização e Recuperação (271,66 hectares), especialmente criadas para esse efeito. o Serão recolhidas sementes e/ou serão transplantados indivíduos destas espécies na área de implantação do projeto agrícola, previamente à fase de construção; o Serão efetuadas sementeiras, ou plantações por estacaria, durante os meses de outubro ou novembro, em função da espécie; o Posteriormente, nas Zonas de Valorização e Recuperação: ☐ delimitação das sementeiras realizadas; ☐ proibição da circulação de viaturas; ☐ condicionamento da intervenção e/ou realização de gestão seletiva de matos, conforme estabelecido no PGF.	Elevação do estado de conservação do habitat 2260	28,23	2026-2042
F.1.1 - Área a converter em faixa de proteção à N253	**13,86**	Proteção microclimática Produção de madeira Produção de cortiça Produção de fruto Conservação de habitats classificados Conservação de espécies da flora e fauna protegida Conservação dos recursos genéticos Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas	Proteção; Produção florestal;	- Sinalização da regeneração natural - Seleção de árvores de fruto - Controlo da vegetação espontânea - Controlo de espécies invasoras - Desramação - Destroçamento de sobrantes - Poda sanitária - Abate sanitário - Marcação e Piquetagem - Armação do terreno em montículo -

Anexo 1.5 – Atas de Reuniões

[*minuta – para efeitos de discussão – 26.01.2026*]

AIA N.º 565 – CCDR ALENTEJO

PROJETO AGROFLORESTAL DAS HERDADES DA MURTA E MONTE NOVO

ATA DA REUNIÃO DE 09.01.2026

ICNF: Francisco Faria

Ilídio Ribeiro

Sandro Nóbrega (por videoconferência)

Susana Lavado

Catarina Carvalho

Expoente Frugal: Afonso Cuco

Ricardina Fialho

José Eduardo Martins

João Pedro Matos Fernandes

Guilherme Mata da Silva

Ordem de trabalhos: Discussão da Reformulação do Projeto (art. 16.º do RJAIA)

O Eng.º João Pedro Matos Fernandes pediu autorização para tomar da palavra e dar início à reunião, sublinhando a importância de discutir balizas para a reformulação do Projeto ao abrigo do disposto no artigo 16.º do regime de AIA. Referindo que o convite à reformulação tem implícito um caminho conducente a uma DIA favorável condicionada, as posições assumidas pelo ICNF e pela APA/ARH, o primeiro sobre a conservação de valores naturais na ZEC Comporta-Galé, e a segunda quanto à disponibilidade de água, são interdependentes, na medida em que as necessidades de água dependem diretamente da área dos setores de plantação.

No âmbito da reformulação do Projeto, o proponente estudou a título preliminar três soluções alternativas, estando disponível para comprometer-se com qualquer uma delas. Dito isto, considera que a terceira solução, correspondente a uma maior área afeta a setores de plantação, encontra um equilíbrio adequado entre as necessidades do Projeto e a conservação da natureza. Em qualquer caso, a localização dos setores de plantação em todas as alternativas segue os princípios adotados no EIA submetido de dar prioridade a áreas sem habitats prioritários ou de conservação prioritária, ou em que estes últimos ocorrem em estado degradado, e procurou-se que constituam um contributo para o controlo de pressões negativas com grande expressão na ZEC, designadamente incêndios e a proliferação de espécies invasoras como a acácia-de-espigas (*Acacia longifolia*).

A Eng.ª Ricardina Fialho desenvolveu a apresentação das soluções alternativas, referindo que a primeira solução elimina cerca de 1,4 ha de habitats prioritários, sem prejuízo de, como referido pela Eng.ª Susana Lavado, estas não serem as únicas áreas de preocupação. A segunda solução exclui habitats prioritários e em consociação com habitats prioritários em estado de conservação bom, e a terceira solução considera mais área agrícola porque inclui áreas que, embora contenham espécies relevantes, estão sujeitas a pressão, nomeadamente de acácias. Nesta solução, alguns dos setores de plantação mantidos criam uma barreira à expansão de acácias de Norte para Sul.

Os representantes do ICNF pronunciaram-se sobre as propostas descritas, tendo o Eng.º Francisco Faria referido que o controlo de invasoras pode ser feito através de medidas que não a implantação de setores agrícolas, como a requalificação de habitats ou outras. A Eng.ª Susana Lavado notou que a dimensão da propriedade obriga à elaboração de um Plano de Gestão Florestal, incluindo o tema do controlo de espécies invasoras.

A Eng.ª Ricardina Fialho referiu que o EIA já contempla um conjunto de medidas que contribuem para a conservação e recuperação de habitats, incluindo a recolha de espécimes e sementes, e que o PGF já foi proposto e aprovado pelo ICNF na sequência do desenvolvimento de outros projetos do proponente.

O Dr. Sandro Nóbrega acrescentou que, independentemente do projeto agrícola, há sempre necessidade de controlar as acácias, nomeadamente quando a herdade seja gerida apenas do ponto de vista florestal. Referiu ainda que na visita de campo a espécie

de acácia avistada foi a acácia-de-espigas (*Acacia longifolia*), sujeita a controlo biológico por parte da vespa *Trichilogaster* (responsável pelas galhas da acácia), bastante eficaz no controlo de sementes e que pode limitar expansão das acácias. A respeito das peças desenhadas remetidas pelo proponente, assinalou que pelo menos um dos documentos PDF utiliza a mesma cor para ilustrar situações distintas.

O Eng.º Ilídio Ribeiro referiu que, da análise feita até ao momento da reunião, das três soluções alternativas apresentadas, aquela que vai mais ao encontro das preocupações do ICNF é a segunda, a que corresponde a menor área de plantação. Acrescentou que aquilo que releva para a análise do ICNF é não tanto a área total dos setores de plantação, mas saber que os habitats não são afetados. Nesse sentido, o projeto deve dirigir-se às áreas em que o habitat se encontra degradado, sendo que mesmo na segunda solução foi verificada a afetação de áreas em estado evolutivo. A Eng.ª Ricardina Fialho referiu que no EIA foi utilizado o critério de estado de conservação bom/mau, validado pelo ICNF na fase de conformidade. Sem prejuízo, e admitindo que seja considerada no âmbito da reformulação do Projeto a segunda solução das três apresentadas, o Eng.º Ilídio Ribeiro solicitou a justificação da ocupação das áreas de habitat em estado de conservação evolutivo.

A Eng.ª Susana Lavado solicitou o envio, no âmbito da reformulação do Projeto, de informação completa que permita a apreciação do EIA reformulado, designadamente as *shapefiles* / cartografia relativa ao estado de conservação utilizada como base para o desenvolvimento das propostas de soluções. Foi pedido que, após partilha destes elementos, o ICNF comunicasse eventuais áreas a excluir expressamente dos setores de plantação.

Em resposta ao comentário do Eng.º Ilídio Ribeiro sobre a justificação da ocupação de pequenas áreas de habitats com estado de conservação evolutivo, a Eng.ª Ricardina Fialho questionou o ICNF sobre a possibilidade de aplicar um critério de “balanço zero”, compensando qualquer ocupação destas áreas mediante a recuperação de área idêntica ou mesmo superior em zonas de habitat degradado, evitando a dispersão das áreas agrícolas que possam inviabilizar o projeto do ponto de vista técnico e contribuindo para a criação e manutenção de áreas de continuidade, em linha com os objetivos afirmados pelo ICNF. Mais se comprometeu a remeter ao ICNF toda a informação cartográfica

solicitada. Sobre a proposta relativa à aplicação do critério de "balanço zero", referida pela Eng.ª Ricardina como já utilizada em projetos de outras regiões, o Eng.º Ilídio Ribeiro referiu que a adequação da mesma poderá também ser analisada no contexto deste projeto.

A título conclusivo, o Dr. Sandro Nóbrega notou que quando se fala em habitat degradado pode distinguir-se entre situações em que o habitat não tem potencial de melhoria do estado de conservação em virtude das condições existentes, nomeadamente edafoclimáticas, e situações em que, existindo esse potencial de melhoria, o habitat se degradou por efeito de pressões naturais ou humanas, referindo ainda que, com base no conhecimento que tem da área do Projeto, existe potencial de melhoria das áreas em que ocorrem habitats em estado degradado.

[*minuta – para efeitos de discussão – 11.05.2026*]

AIA N.º 565 – CCDR ALENTEJO

PROJETO AGROFLORESTAL DAS HERDADES DA MURTA E MONTE NOVO

ATA DA REUNIÃO DE 07.05.2026

- **Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.**
  - Felisbina Quadrado
  - Lia Reis
  - Ana Rita Lopes
- **Expoente Frugal, Lda. (Proponente)**
  - Ricardina Fialho
  - João Pedro Matos Fernandes
  - Guilherme Mata da Silva

Em sede introdutória, o Eng.º João Pedro Matos Fernandes referiu que a reunião foi solicitada na sequência de anterior reunião após a notificação da proposta de reformulação do projeto, nos termos do disposto no n.º 2 do artigo 16.º do RJAIA. Mais referiu que a adaptação do projeto aos pareceres recebidos se tinha iniciado com um conjunto de reuniões com o ICNF, das quais resultou uma pequena redução da área dos setores de plantação com vista a salvaguardar um conjunto áreas de habitats que o ICNF considerou deverem ser preservados. Por fim, referiu que o Proponente solicitou e obteve um PIP para a captação de água subterrânea, considerando uma área a regar de cerca de 297 ha e um volume máximo autorizado de 1,74 hm^3/ano.

A Eng.ª Ricardina Fialho esclareceu que, face ao resultado da articulação com o ICNF, os valores a considerar no EIA reformulado não serão os totais constantes do PIP, mas ligeiramente inferiores. Passou então a apresentar a metodologia adotada para efeitos do PIP e as medidas de prevenção e mitigação de riscos de degradação do estado quantitativo e qualitativo da massa de água constantes do PIP e que o Proponente se propõe transpor para o EIA.

A Eng.ª Felisbina Quadrado sublinhou a importância de uma gestão integrada da água, considerando simultaneamente as águas subterrâneas e superficiais, e referiu que teria preferido uma solução que considerasse ou mesmo privilegiasse as águas superficiais, mais referindo que o Aproveitamento de Fins Múltiplos do Alqueva se encontra a reforçar a entrega de água a outros aproveitamentos, nomeadamente hidroagrícolas. Considera ainda que ao abrigo dos princípios da precaução e da prevenção, e à luz do artigo 10.º do regime da utilização dos recursos hídricos, a atribuição de títulos depende da efetiva existência de disponibilidades hídricas suficientes. Em qualquer caso, notou que, tendo sido essa a decisão superior da APA, será considerado o valor do PIP emitido.

Os representantes do Proponente esclareceram que todas as origens de água foram equacionadas, tendo sido excluída a possibilidade de irrigação com recurso a uma captação do canal de rega do Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Sado (AHVS) que abastece parte das propriedades situada em área da RNES e dedicadas ao cultivo do arroz, áreas essas não contemplada pelos setores de plantação. A impossibilidade desta medida, prevista no EIA anterior, deveu-se às regras aplicáveis aos aproveitamentos hidroagrícolas, ao abrigo das quais o Proponente é considerado um utilizador precário, sendo vedada a utilização de água do perímetro de rega para culturas permanentes, devido ao disposto no Despacho do Ministério da Agricultura n.º 2/2023. Apesar de ter obtido da área governativa responsável pela Agricultura informação de que estaria em curso uma iniciativa de alteração dos perímetros de rega, não tem conhecimento de que a associação de regantes do AHVS tenha proposto qualquer alteração que pudesse incluir as áreas dos setores de plantação do presente projeto no perímetro de rega.

Quanto aos cenários da utilização de ApR e água dessalinizada, foi esclarecido que os mesmos não eram viáveis, o primeiro em virtude da insuficiência da disponibilidade de ApR, e o segundo por se revelar economicamente inviável dadas as limitações à localização da captação de água e rejeição de salmoura, que não pode ser feita no estuário do Sado, e as distâncias exigidas por uma solução de captação fora do estuário.

Foi ainda referido que o projeto anterior previa a rega com recurso a níveis superficiais do aquífero (cerca de 40 m), permitindo o aproveitamento da parte que resultasse da ineficiência da rega e que se infiltrasse no solo, sendo apenas o remanescente captado a níveis mais profundos do aquífero (cerca de 210 m).

A Eng.ª Lia Reis referiu ainda a preocupação com a gestão da evolução da cunha salina, referindo que, apesar de ainda não existirem evidências do seu aumento, este é um aspeto que está a ser ativamente acompanhado.

A Eng.ª Ricardina Fialho referiu as medidas de monitorização da cunha salina que o Proponente se propôs adotar nas captações objeto do PIP, tendo sido proposta a realização de monitorizações trimestrais nos dois primeiros anos do projeto, e semestrais após este prazo.

Os representantes da APA e do Proponente acordaram ainda quanto à importância de manter em aberto a possibilidade de recurso a origens alternativas de água, designadamente com o recurso a águas superficiais, caso venham a tornar-se viáveis no horizonte do projeto. A APA considerou importante que essa referência fosse feita e que iria sensibilizar superiormente para que o Despacho acima mencionado fosse revisto, assim como fosse dado seguimento à revisão e atualização das áreas afetas aos aproveitamentos hidroagrícolas, que datam dos anos 80, para promover uma gestão mais eficiente e adaptativa dos recursos hídricos existentes.

Inês Vieira

De:	Ricardina Fialho
Enviado:	20 de maio de 2026 15:51
Para:	judite.fernandes@lneg.pt
Cc:	teresa.leao@lneg.pt; ana.picado@lneg.pt; Matos Fernandes; 582 _EIA.murtamontenovo
Assunto:	[PG0582] - Envio de estudo apresentado durante a reunião de dia 06 de maio de 2026

Boa tarde, Eng.ª Judite Fernandes,

Na sequência da reunião realizada no passado dia 6 de maio de 2026, cuja disponibilidade desde já agradecemos, venho por este meio remeter o estudo apresentado durante a referida reunião.

Link 01 (atividade 4 do estudo) : https://we.tl/t-oo3ySPz8ZnUW3BjM
"Este estudo contém segredo comercial que está protegido pela legislação em vigor, sendo, também, proibida a reprodução total ou parcial do estudo, a sua divulgação seja por que meio for, ou a sua utilização para outros fins que não os da mera apreciação por parte do LNEG."

Link 02 (artigos relevantes): https://we.tl/t-PyWPH3RNMG1geMO5

Mais se requer a V. Exª que ao abrigo do artigo 106, nº 1 do CPA, me seja enviado comprovativo da boa receção do presente email.

Com os melhores cumprimentos,

Ricardina Fialho
Engenheira de Recursos Hídricos| Water Resources Engineer
___
T. +351 916 003 493
ricardinafialho@rioseaquiferos.com

rioseaquiferos.com; water2you.net



Anexo 1.6 – Nota nº 063/2026 – Levantamento de Restrições de Licenciamento em Massas de Água

Nota à Comunicação Social
N.º 063/2026
16 MAI | 10h00

LEVANTAMENTO DE RESTRIÇÕES DE LICENCIAMENTO EM MASSAS DE ÁGUA

APA apela a uso rigoroso de recurso estratégico

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) procedeu, no início de maio, ao levantamento adicional de restrições de licenciamento em diversas massas de água subterrânea, na sequência da análise dos dados de monitorização relativos a abril de 2026.

Os resultados obtidos em 313 pontos de observação, distribuídos por 54 massas de água subterrânea, indicam que a maioria apresenta níveis próximos ou acima da média histórica.

O levantamento abrangeu a massa de água de Moura-Ficalho, na Região Hidrográfica do Guadiana (RH7), e todas as massas de água do Algarve, na Região Hidrográfica das Ribeiras do Algarve (RH8), com exceção da Campina de Faro – Subsistema de Vale de Lobo e da «área crítica para extração de água subterrânea», correspondente à faixa costeira destinada à prevenção da intrusão salina.

A monitorização permite ainda prosseguir o levantamento gradual de restrições noutras massas de água, designadamente na Bacia do Tejo-Sado (Margem Esquerda).

A APA sublinha, contudo, que a recuperação observada não é homogénea nem estrutural, persistindo situações de elevada vulnerabilidade.

Nesse sentido, tanto os requerimentos pendentes como os novos requerimentos que vierem a ser submetidos continuarão sujeitos a análise rigorosa por parte da APA, em função das condições de cada massa de água e da eficiência da utilização proposta.

Os Títulos de Utilização de Recursos Hídricos a emitir destinam-se exclusivamente a fins agrícolas e industriais, ficando condicionados:

- à demonstração da inexistência de outras origens de água;
- ao controlo dos volumes captados com reporte automático;
- à instalação de sensores de nível com teletransmissão, em local a definir.

Os volumes autorizados poderão ser revistos sempre que os níveis do aquífero o justifiquem, ao abrigo do n.º 1 do artigo 28.º do Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio, podendo as captações ser temporariamente suspensas em situações críticas.

Enquanto Autoridade Nacional da Água, a APA prossegue uma política de promoção do uso sustentável da água, assente na proteção de longo prazo dos recursos hídricos, nos termos da Lei da Água.

A APA apela, por isso, a uma utilização particularmente rigorosa das águas subterrâneas, enquanto reservas estratégicas essenciais ao abastecimento público e à segurança hídrica do país.

Neste contexto, considera fundamental a colaboração dos utilizadores, designadamente através da comunicação contínua dos volumes captados.

A APA continuará a acompanhar de perto a evolução do estado quantitativo das massas de água, com base na monitorização mensal, no quadro de uma ação concertada indispensável para garantir a disponibilidade deste recurso para as gerações presentes e futuras.

###

media@apambiente.pt
Rua da Murgueira 9 – Zambujal – Alfragide
2610-124 Amadora
(+351) 214728200
apambiente.pt

Proteja o ambiente. Pense se é mesmo necessário imprimir este email!

Anexo 1.7 - PIP092903.2026.RH6 emitido a 20/04/2026

Processo n.º: 450.10.01.004551.2026.RH6

Utilização n.º: PIP092903.2026.RH6

Início: 2026/04/20

Validade: 2027/04/20

Informação Prévia

Identificação

Código APA	APA10722343
País*	Portugal
Número de Identificação Fiscal*	516802933
Nome/Denominação Social*	EXPOENTE FRUGAL, LDA
Idioma	Português
Morada*	Rua Castilho, 213, 5º
Localidade*	Lisboa
Código Postal	1250-068
Concelho*	Lisboa
Telefones	916758692
Obrigação de correcção de Dados de Perfil	|_|

Caracterização

Designação da utilização	Captação de Água Subterrânea - PIP
Tipo de Captação	Subterrânea
Tipo de infraestrutura	Furo vertical
Uso	Particular
Caracterização da utilização	Captação a caracterizar após pesquisa. Remete-se para a Memória Descritiva em anexo, com a informação necessária para análise do PIP.
Prédio/Parcela	Herdade de Murta e Monte Novo
Dominialidade	Domínio Hídrico Privado
Nut III - Concelho - Freguesia	Alentejo Litoral / Alcácer do Sal / Comporta
Longitude	-8.708102
Latitude	38.402334
Região Hidrográfica	Sado e Mira
Bacia Hidrográfica	Sado
Sub-Bacia Hidrográfica	PT06SAD1219 :: Sado-WB5
Tipo de massa de água	Subterrâneas
Massa de água	PT05T3 :: BACIA DO TEJO-SADO / MARGEM ESQUERDA
Classificação do estado/potencial ecológico (superficial) ou estado (subterrânea) da massa de água	Medíocre

Finalidades

Rega	|X|

Condições Gerais

1ª O conteúdo desta informação prévia é válido pelo período de 1 ano a contar da data de emissão, salvo nos casos previstos no n.º 4 do artigo 11.º do Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio, bem como no caso em que seja deferido um pedido de utilização reconhecido como prioritário e não compatível com o presente pedido; Seja emitida Declaração de Impacte Ambiental desfavorável; Sejam emitidos pareceres vinculativos desfavoráveis, nomeadamente no âmbito das consultas a promover; Se verifique alteração das circunstâncias existentes à data da emissão da presente informação, nomeadamente a degradação das condições do meio hídrico; Ocorram secas ou outras catástrofes naturais, ou outro caso de força maior.

2ª A presente informação não substitui o pedido de título de utilização dos recursos hídricos, o qual terá de ser apresentado de acordo com o que estabelece o artigo 14.º do Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio e instruído com os elementos previstos na Portaria n.º 1450/2007, de 12 de novembro.

3ª Na instrução do pedido de título de utilização e para as parcelas de terreno identificadas que não sejam propriedade do requerente, terá de ser apresentado o título que confere o direito à sua utilização e, quando este título não consubstancie um contrato de arrendamento, deverá juntar declaração de permissão do proprietário do terreno, bem como cópia do respetivo título de propriedade.

4ª A utilização está abrangida por legislação especial nos termos do artigo 71.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro, na sua redação atual.

5ª A utilização está sujeita a avaliação de impacte ambiental nos termos do Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 152-B/2017, de 11 de dezembro.

6ª Pela utilização de recursos hídricos é devida a Taxa de Recursos Hídricos (TRH) conforme dispõe o n.º 2 do artigo 77.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro e nos termos previstos no Decreto-Lei n.º 97/2008, de 11 de junho, ambos na sua redação atual.

Condições Específicas

1ª Para as captações de água, superficiais ou subterrâneas, destinadas ao abastecimento público, devem ser promovidos os estudos conducentes à delimitação dos perímetros de proteção, realizados de acordo com o artigo 37.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro, o artigo 43.º do Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio e o Decreto-Lei n.º 382/99, de 22 de setembro, a ser entregues com o requerimento de pedido de utilização anteriormente mencionado.

Outras Condições

1ª O Pedido de Informação Prévia enviado em 20/03/2026, relativo à utilização captação de água para rega de 297,43 ha de tangerina (Projeto Agroflorestal da Herdade de Murta e Monte Novo), mereceu parecer favorável, devendo respeitar as condicionantes definidas nesta Informação Prévia.

2ª As intervenções só serão permitidas desde que não afetem os usos principais dos recursos hídricos, a compatibilidade com outros usos secundários, o estado da massa de água, a integridade dos leitos e margens e dos ecossistemas presentes, assim como a integridade das implantações licenciadas.

3ª A emissão de Título de Utilização de Recursos Hídricos (TURH) está condicionada à obtenção de Declaração de Impacte Ambiental favorável ou favorável condicionada em sede de avaliação de impacte ambiental.

4ª O volume total a atribuir nos TURH não poderá exceder 1,74 hm3/ano.

5ª Atendendo ao disposto no art.º 28º Decreto-Lei n.º 226-A/2007 de 31 de Maio, os eventuais títulos de utilização podem ser modificados por iniciativa da APA, ainda que em termos temporários, sempre que: • Se verificar uma alteração das circunstâncias de facto existentes à data da emissão do título e determinantes desta, nomeadamente a degradação das condições do meio hídrico; • Os dados de monitorização ou outros indicarem que não é possível serem alcançados os objetivos ambientais, conforme previsto no artigo 55.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro; • Seja necessária a sua adequação aos instrumentos de gestão territorial e aos planos de gestão de bacia hidrográfica aplicáveis; • Se verifique uma seca, catástrofe natural ou outro caso de força maior.

6ª Em caso de seca declarada conforme o estipulado nas alíneas o) e p) do n.º 2 do artigo 8.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro, na sua redação atual, a APA, I.P., enquanto Autoridade Nacional da Água, poderá condicionar o volume autorizado na proporção direta da diminuição da precipitação face à Normal Climatológica 1991-2020 da estação meteorológica do IPMA de Alcácer do Sal.

7ª O volume mínimo nunca poderá ser inferior às necessidades hídricas de sobrevivência da cultura.

8ª Em caso de conflito de usos dos recursos hídricos, será dada prioridade às captações de água para abastecimento público, sendo ainda considerados os critérios de preferência estabelecidos no plano de gestão de bacia hidrográfica.

9ª O regime de exploração poderá ser condicionado caso promova um rebaixamento piezométrico desfavorável face ao regime de exploração dos polos de abastecimento público.

10ª A APA, I.P. reserva-se o direito de ordenar a interrupção das bombagens, podendo haver lugar a revisão ou revogação do título de captação, se forem detetados impactes negativos resultantes da captação face às disponibilidades hídricas locais ou regionais.

11ª 12. Caso se verifique conflito com outros utilizadores da mesma massa de água, com captações localizadas a uma distância inferior a 100 m, ou em captação pública, a eventual utilização desta captação será condicionada aos resultados de um Estudo Hidrogeológico, cuja realização ficará a cargo do utilizador, podendo em seu resultado ser fixado um teto de caudal de exploração. A data de realização dos trabalhos deve ser comunicada a este Serviço a fim de poder ser acompanhada.

Administrador Regional da ARH Alentejo



Rui Sequeira

REPÚBLICA PORTUGUESA
AMBIENTE

APA/ARH Alentejo
Av. Engenheiro Arantes e Oliveira, n.º 193
7004-514 Évora
Telefone: +351 266 768 200 / Fax: +351 266 768 230
e-mail: arhalt.geral@apambiente.pt - http://www.apambiente.pt

Localização da utilização

Peças desenhadas da localização



APA/ARH Alentejo
Av. Engenheiro Arantes e Oliveira, n.º 193
7004-514 Évora
Telefone: +351 266 768 200 / Fax: +351 266 768 230
e-mail: arhalt.geral@apambiente.pt - http://www.apambiente.pt

Anexo 1.8 – Referência nº 652/ADM-GO/2026 - Inviabilidade de fornecimento de água para reutilização

Ricardina Fialho

De: Nuno Correia <n.correia@ADP.PT>
Enviado: 11 de março de 2026 12:36
Para: afonso.cuco@aquaterra.farm
Cc: Ricardina Fialho; fernando@aquaterra.farm; gonzalo.roca@aquaterra.farm; Patricia Palma; Diogo Nascimento
Assunto: 652/ADM-GO/2026 - Pedido de informação – Viabilidade de fornecimento de água para reutilização (DL n.º 119/2019)

N/ Ref.ª: 652/ADM-GO/2026
Data: 11.03.2026

Exmos. Senhores,

Na sequência da solicitação apresentada relativamente à avaliação da disponibilidade de efluente tratado na ETAR da Comporta para eventual produção de ApR, e atendendo ao enquadramento legal aplicável, apresentam-se as seguintes considerações técnicas sobre as questões elencadas por V.exas.

1. Disponibilidade de efluente tratado para produção de ApR
Após análise interna, informa-se que não existe, atualmente, qualquer avaliação específica ou dados operacionais que permitam determinar a disponibilidade efetiva ou previsional de volumes de efluente tratável enquanto ApR.

2. Classe de qualidade e requisitos técnicos
A ETAR da Comporta não está equipada com sistema de tratamento para produção de ApR, e por esse motivo não possuindo definida qualquer classe de qualidade ao abrigo do Decreto-Lei n.º 119/2019.

3. Licenciamento para produção de ApR
A ETAR não possui licença de produção de ApR emitida pela APA, nem existe procedimento em curso com vista à sua obtenção.

4. Plano de Gestão de Risco (PGR)
Não existe PGR elaborado ou em elaboração, uma vez que este documento integra o processo de licenciamento de produção e utilização de ApR.

5. Condições técnicas e infraestruturais para fornecimento
Até à data não foram desenvolvidos estudos técnicos sobre caudais mobilizáveis, armazenagem, necessidades de reforço de tratamento, dado que, à data, não está prevista a implementação de um sistema de produção de ApR nesta ETAR.
Mais se informa que a produção de ApR para utilização agrícola não parece que seria técnica ou financeiramente viável, considerando o volume anual tratado (aprox. 50 000 m^3/ano) e as necessidades hídricas do projeto (aprox. 2,28 hm^3/ano - 360ha cultura: tangerina), em que apenas poderia ser suprida cerca de 1,8% das necessidades hídricas anuais (correspondente a aproximadamente 5ha da cultura em causa), mesmo admitindo um cenário de utilização da totalidade do efluente tratado para produção de ApR.

6. Enquadramento contratual
A AgdA não dispõe, atualmente, de modelo contratual ou estrutura tarifária aplicável ao fornecimento de ApR.

Face ao exposto, confirma-se que:

- A ETAR da Comporta não reúne à data condições técnicas, operacionais ou legais para disponibilizar efluente tratado para produção e utilização de ApR para fins agrícolas.
- A discrepância entre o hipotético volume disponível para produção de ApR e as necessidades hídricas do projeto torna essa utilização pouco viável, mesmo em cenário de desvio integral do efluente tratado para esse fim.

- Não existem, à data, procedimentos de licenciamento, planos de risco ou modelos contratuais aplicáveis à produção/fornecimento de ApR nesta instalação.

Nos termos solicitados, a presente comunicação constitui a formalização da confirmação da não disponibilidade das informações solicitadas e da insuficiência de efluente tratado para efeitos de produção de ApR em condições técnica e financeiramente viáveis.

Com os melhores cumprimentos,

Nuno Correia
Coordenador de Gestão de Origens

ÁGUAS PÚBLICAS DO ALENTEJO
Grupo Águas de Portugal

Rua Dr. Aresta Branco nº51 | 7800-310 Beja | Tel. Geral: 284101100 | Fax.: 284101199 | www.agda.pt



Tenha uma EcoAtitude. Imprima este e-mail apenas se necessário.
Esta mensagem e os ficheiros anexos podem conter informação confidencial ou reservada. Se, por engano, receber esta mensagem, solicita-se que informe de imediato o remetente e que elimine a mensagem e ficheiros anexos sem os reproduzir.
This message and any files herewith attached may contain confidential or privileged information. If you receive this message in error, please notify us immediately and delete this message and any files attached without copying them in any way.

Na eventualidade de a presente mensagem ser inadvertidamente rececionada no período de descanso, o que se lamenta, a AGDA reitera que não é expectável que a mesma seja lida, respondida ou que relativamente à mesma seja tomada qualquer ação, fora do seu horário de trabalho.
In the event that this message is inadvertently received during the rest period, which is regrettable, it is not expected that it will be read, respond to or any action taken, outside your usual working hours.

De: Afonso Cuco <afonso.cuco@aquaterra.farm>
Enviada: 2 de março de 2026 18:23
Para: Diogo Nascimento <d.nascimento@ADP.PT>
Cc: Ricardina Fialho <ricardinafialho@rioseaquiferos.com>; Fernando Infante Câmara <fernando@aquaterra.farm>; Gonzalo Roca <gonzalo.roca@aquaterra.farm>
Assunto: Pedido de Informação – Viabilidade de Fornecimento de Água para Reutilização (DL n.º 119/2019)

Exmos. Senhores
Conselho de Administração das Águas Públicas do Alentejo, S.A.,

No âmbito do procedimento de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) do Projeto Agroflorestal das Herdades da Murta e Monte Novo, e na sequência da reunião técnica realizada ao abrigo do artigo 16.º do Regime Jurídico de AIA, foi solicitado pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) que o Promotor

avalie a viabilidade da utilização de Água para Reutilização (ApR) proveniente da ETAR da Comporta como origem alternativa para a rega do pomar de tangerinas previsto no projeto.

Atendendo ao disposto no Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, na sua redação atual, que estabelece o regime jurídico de produção de água para reutilização obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como ao Regulamento (UE) 2020/741, relativo aos requisitos mínimos para a reutilização da água, vimos, pelo presente, solicitar a V. Exas. informação que permita avaliar a viabilidade técnica, ambiental e jurídica desta solução, designadamente:

1. A disponibilidade atual e previsional de efluente tratado suscetível de valorização como ApR;
2. A classe de qualidade potencialmente aplicável à rega agrícola de culturas arbóreas, nos termos dos anexos do DL n.º 119/2019, e respetivos parâmetros médios de qualidade (nomeadamente E. coli, SST, turbidez, nutrientes, condutividade elétrica e sódio);
3. A existência de licença de produção de ApR emitida pela APA para a ETAR da Comporta, nos termos do artigo 6.º do referido diploma, ou a viabilidade de instrução de procedimento com vista à sua obtenção;
4. A eventual necessidade de elaboração e articulação do Plano de Gestão de Risco para a Reutilização (PGR), conforme previsto no artigo 8.º do DL n.º 119/2019, bem como os elementos técnicos disponíveis que possam suportar essa avaliação;
5. As condições técnicas, operacionais e infraestruturais necessárias ao fornecimento (incluindo caudais disponíveis, regime sazonal e eventuais requisitos de armazenamento ou reforço de tratamento);
6. O enquadramento contratual e os procedimentos administrativos aplicáveis à formalização de eventual acordo de fornecimento de ApR.

Mais se solicita que, caso se mantenha a situação anteriormente verificada de ausência ou insuficiência de efluente tratado disponível para valorização como ApR, seja essa circunstância formalmente confirmada, por forma a permitir ao Promotor fundamentar adequadamente a análise de alternativas no âmbito do procedimento de AIA.

A presente solicitação visa permitir ao Promotor dar cumprimento às orientações da APA no âmbito do procedimento de AIA, assegurando uma avaliação devidamente fundamentada quanto à utilização de ApR para fins agrícolas, em conformidade com o regime legal aplicável.

Manifestamos desde já total disponibilidade para realização de reunião técnica de articulação, caso V. Exas. considerem oportuno.

Com os melhores cumprimentos,
Pelo Promotor,
Afonso Cuco

Afonso Cuco
tlm. (+351) 912 432 426
Alfrapark
Edifício G – 3º piso
2610-008 Alfragide
aquaterra.farm

Anexo 1.9 – Estudo de Viabilidade de uma Estação de Dessalinização para Produção de Água para Rega das Herdades da Aquaterra – Murta e Monte Novo

APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

09/02/2026

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UMA ESTAÇÃO DE DESSALINIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA REGA DAS HERDADES DA AQUATERRA – MURTA E MONTE NOVO

OBJETIVO

PRODUZIR ÁGUA DESSALINIZADA COM CARACTERÍSTICAS ADEQUADAS PARA REGAR AS PLANTAÇÕES DE TANGERINA DAS HERDADES DE MURTA E MONTE NOVO E ASSIM EVITAR O USO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

REQUISISTOS PRINCIPAIS

- Estação de Dessalinização de Água do Mar (EDAM) com Captação de água bruta e Descarga de salmoura no mar
- Possibilidade de ampliação futura
- Conjugar a capacidade de produção do sistema de dessalinização com o armazenamento de água, em charcas, durante os meses de menor consumo

METODOLOGIA SEGUIDA

Definição dos objetivos de qualidade a atingir pela água tratada

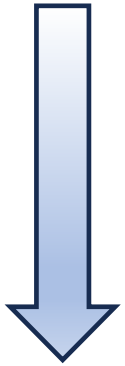
Definição do modo de funcionamento do sistema

Definição dos dados de base necessários para o dimensionamento da EDAM

Estimativa CAPEX e OPEX

OBJETIVOS DE QUALIDADE A ATINGIR PELA ÁGUA TRATADA

- Sódio ≤ 90 mgNa/L
- Cloretos ≤ 140 mgCl/L
- Boro ≤ 1 mgB/L



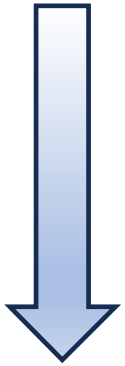
Estes parâmetros condicionaram o dimensionamento da Osmose Inversa

- Condutividade ≤ 1 000 µS/cm
- SDT ≤ 1 000 mgSDT/L
- Turvação ≤ 1,0 NTU



Estes parâmetros não são limitativos num processo convencional de osmose inversa

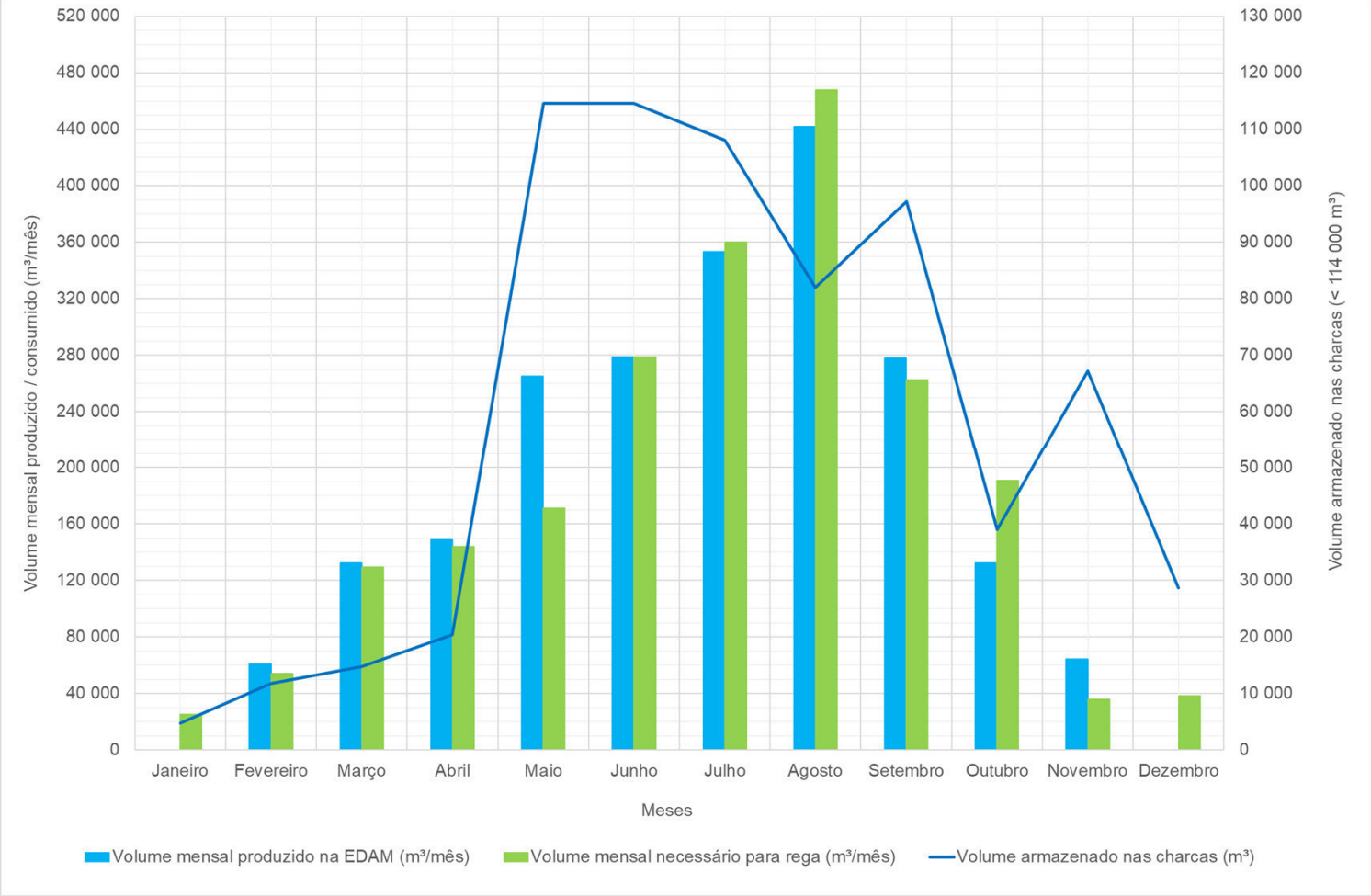
- Alcalinidade ≥ 60 mg/L CaCO3
- Dureza total ≥ 60 mg/L CaCO3
- pH ≥ 6,8 e ≤ 9,0 unidades de pH



Estes parâmetros condicionaram o dimensionamento da remineralização

MODO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO

- O **volume anual de água dessalinizada a produzir** deverá ser de aproximadamente **2,2 hm³/ano**;
- O volume mensal a produzir será ajustado às reais necessidades de cada mês
- Durante o mês de **Agosto** o sistema atingirá a sua capacidade nominal de produção (**165 L/s**), sendo ainda necessário recorrer ao volume de água armazenado nas charcas para fazer face às necessidades de rega
- Nos restantes 11 meses o sistema reduzirá a sua produção (ficando mesmo parado durante 2 meses), dado as necessidades para rega serem inferiores. Nestes períodos a água dessalinizada em excesso será armazenada nas charcas para uso nos meses de maior consumo (Junho, Julho e Agosto)



CAUDAIS NECESSÁRIOS

FLUIDO	CAUDAIS MÁXIMOS NOMINAIS (volume anual máximo; equivalente ao funcionamento do sistema durante 365 dias ao caudal nominal)	CAUDAIS NECESSÁRIOS (volume anual necessário; equivalente ao funcionamento do sistema durante 155 dias ao caudal nominal)
ÁGUA BRUTA	**13,0 hm³/ano** 35 640 m³/dia 1 485 m³/h **413 L/s**	**5,5 hm³/ano** 35 640 m³/dia 1 485 m³/h **413 L/s**
ÁGUA TRATADA	**5,2 hm³/ano** 14 256 m³/dia 594 m³/h **165 L/s**	**2,2 hm³/ano** 14 256 m³/dia 594 m³/h **165 L/s**
SALMOURA	**7,8 hm³/ano** 21 384 m³/dia 891 m³/h **248 L/s**	**3,3 hm³/ano** 21 384 m³/dia 891 m³/h **248 L/s**

Taxa de conversão na OI → 43%

Taxa de conversão global na ED → 40%

(valor conservativo)

TEMPERATURAS, SALINIDADE E NÍVEIS DE ÁGUA NO MAR (valores adotados no dimensionamento da osmose inversa)

Parâmetro	Época húmida e fria	Época intermédia	Época seca e quente	Época muito seca e quente
Nível máximo da água	2,8 mNMM (4,8 mZH)			
Nível mínimo da água	-1,8mNMM (0,2 mZH)			
Temperatura do ar	19 ºC	22 ºC	23 ºC	23 ºC
Salinidade	36 g/L			
Temperatura	16 ºC		18 ºC	

CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DA ÁGUA BRUTA
(outros parâmetros para além da temperatura e salinidade – escolha do tipo de pré-tratamento adequado)

A INFORMAÇÃO ANALÍTICA EXISTENTE PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE VIABILIDADE É ESCASSA:

SST (8 amostragens entre 2010 e 2011 – Fonte SNIRH)

- Matéria em suspensão muito baixa (indicação corroborada pelos resultados de turvação existentes e que são igualmente muito baixos - 9 medições, realizadas entre 2002 e 2006, com mínimo de 0,6 NTU e máximo de 1,5 NTU)

Matéria orgânica (Fonte SNIRH)

- Não há informação relativa à matéria orgânica mas admite-se que possa será uma água de boa qualidade

Clorofila-a (Fonte SNIRH)

- Não há informação

TENDO POR BASE A POUCA INFORMAÇÃO EXISTENTE, FOI ADMITIDO NO ESTUDO QUE O PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA DO MAR DEVERÁ CONSISTIR NUM, OU NO MÁXIMO DOIS, ESTÁGIOS DE FILTRAÇÃO MULTIMÉDIA

TRATAMENTO DA ÁGUA DO NA EDAM

PRÉ-TRATAMENTO
- COAGULAÇÃO
- FLOCULAÇÃO
- FILTRAÇÃO MULTIMÉDIA (1 ou 2 estágios)
- MICROFILTRAÇÃO

OSMOSE INVERSA
- UM PASSO DE OSMOSE INVERSA
- RESERVATÓRIOS DE PERMEADO

PÓS-TRATAMENTO
- REMINERALIZAÇÃO COM DIÓXIDO DE CARBONO, FILTROS DE CALCITE E SODA CÁUSTICA

ADUÇÃO
- RESERVATÓRIOS / CHARCAS DAS HERDADES DE TANGERINA

ESCORRÊNCIAS + SALMOURA / ÁGUAS SUJAS
- SALMOURA SUJA DE LAVAGEM DOS FILTROS MULTIMÉDIA
- ÁGUAS SUJAS DE LAVAGEM DOS FILTROS MULTIMÉDIA (E DE CALCITE)
- EFLUENTES NEUTRALIZADOS RESULTANTES DA LAVAGEM DAS SWM
- DESCARGAS DE FUNDO E DE EMERGÊNCIA (COM EXCEÇÃO DA ÁGUA TRATADA)

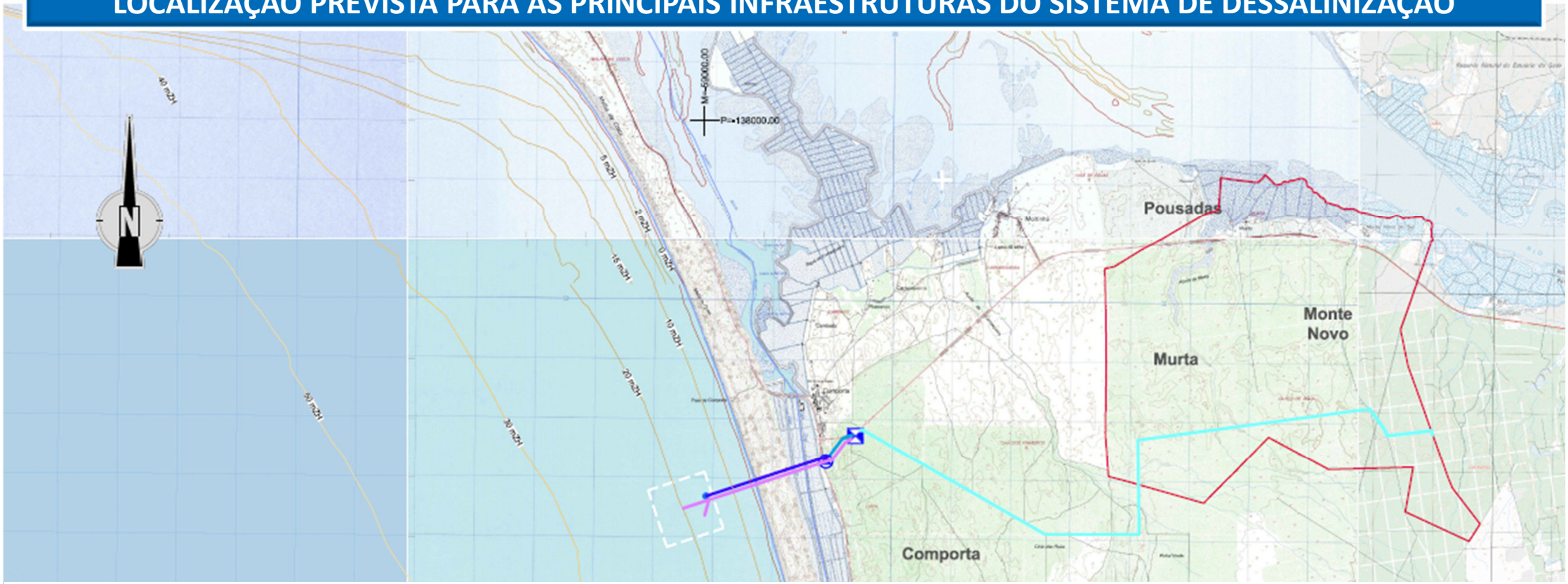
REJEIÇÃO NO MAR

PRODUÇÃO DE LAMAS
- EQUALIZAÇÃO DE SALMOURA SUJA DE LAVAGEM DOS FILTROS MULTIMÉDIA
- ELEVAÇÃO DE LAMAS EQUALIZADAS

TRATAMENTO
- ESPESSAMENTO DE LAMAS
- ARMAZENAENTO DE LAMAS ESPESSADAS
- DESIDRATAÇÃO DE LAMAS

DESTINO FINAL
- ARMAZENAMENTO EM SILOS DE LAMAS DESIDRATADAS E HIGIÉNIZADAS COM CAL
- ENVIO A DESTINO FINAL ADEQUADO DE LAMAS DESIDRATADAS E HIGIÉNIZADAS

LOCALIZAÇÃO PREVISTA PARA AS PRINCIPAIS INFRAESTRUTURAS DO SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO



- **CAPTAÇÃO DE ÁGUA BRUTA NO MAR -** Captação em mar aberto, em torre de tomada
- ELEVAÇÃO DE ÁGUA BRUTA DO MAR – Localizada num terreno a cerca de 380 m Sul da subestação da Comporta, evitando obras na praia da Comporta / ZEC
- TRATAMENTO DA ÁGUA NA ESTAÇÃO DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR (EDAM) – Localizada junto da ETAR da Comporta
- ELEVAÇÃO DA ÁGUA TRATADA - Traçado optimizado para distribuição à totalidade das herdades da Aquaterra
- REJEIÇÃO DA SALMOURA NO MAR (CIRCUITO + DIFUSORES) – Traçado paralelo ao da captação

LOCALIZAÇÃO DA EDAM

VANTAGENS

- Junto de uma infraestrutura já construída como é o caso da ETAR da Comporta
- Proximidade do mar
  - Menor circuito de água bruta, que corresponde a mais do dobro do caudal de água dessalinizada
  - Menor circuito de salmoura
- Pode facilmente fornecer água à vila da Comporta (caso seja necessário)

DESVANTAGENS

- Terrenos não pertencem à Aquaterra (quer da EE1 e EDAM quer da maioria do traçado das condutas)
- Distância elevada até aos pontos de entrega de água dessalinizada



ESTIMATIVA DE CUSTOS DE INVESTIMENTO DO SISTEMA - CAPEX

DESIGNAÇÃO DA INFRAESTRUTURA	CAPEX (MEUROS)
Circuito Tomada de Água - EE1	9,9
EE1	2,8
Circuito EE1 - ED	0,4
EDAM	16,0
Reservatório e EE de água tratada	0,9
Circuito de emergência do reservatório de água tratada	0,7
Circuito EDAM - Ponto de Entrega	4,1
Circuito EDAM - Difusores de salmoura no mar	4,5
Encargos administrativos / legais + Projeto de Execução + Estaleiro + Imponderáveis	3,0
TOTAL (MEUROS)	42,5

ESTIMATIVA DE ENCARGOS DE EXPLORAÇÃO DO SISTEMA - OPEX

PARÂMETRO	Unidades	Valor
ENERGIA		
Custo específico de energia	€/kWh	0,15
Consumo específico de energia	kWh/m³	4,23
Produção anual de água	m³/ano	2 200 000
Consumo anual de energia	kWh/ano	9 299 160
Encargo anual com energia	€/ano	1 394 874
REAGENTES		
Encargo anual de reagentes	€/ano	193 171
CONSERVAÇÃO E MANUTENÇÃO (C&M)		
Encargo de investimento da construção civil (≈ 60% do investimento total)	€	25 525 227
Percentagem anual de C&M em construção civil	%	0,5
Encargo anual de C&M da construção civil	€/ano	127 626
Percentagem anual de C&M em equipamento	€	17 016 818
Coeficiente de C&M do equipamento	%	1,5
Encargo anual de C&M do equipamento	€/ano	255 252
Encargo anual de C&M	€/ano	382 878
SUBSTITUIÇÃO DAS MEMBRANAS		
Percentagem de membranas a serem substituídas por ano (tempo de vida útil de 7 anos)	% / ano	5,0
Preço das membranas de OI	€	860 000,0
Encargo anual com substituição de membranas	€/ano	43 000,0
PLANO DE CONTROLO ANALÍTICO (PCA)		
Preço médio de análise de parâmetros	€/u	15
Número de parâmetros analisados por ano	nº/ano	7 280
Encargo anual	€/ano	109 200
ENCARGO TOTAL DE EXPLORAÇÃO		
ENCARGO TOTAL ANUAL	**M€/ano**	**2,1**

CUSTO ESPECÍFICO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DESSALINIZADA / CONCLUSÃO / RECOMENDAÇÕES

CAPEX / OPEX - Sistema de Dessalização para produção de 2,2 hm³/ano	
CAPEX (MEUROS)	43
OPEX (MEUROS/ano)	2,1
Valores atualizadas a 25 anos com taxa de desconto de 1,0 %	
Custos totais atualizados (MEUROS)	89
CUSTO ESPECÍFICO DE PRODUÇÃO DA ÁGUA (€/m³)	**1,75**

- CUSTO ESPECÍFICO DA ÁGUA DE **1,75 €/m³** DEVIDO A:
  - Investimento elevado e baixa produção anual (produção nominal de água apenas durante 1 mês por ano)
  - Elevado consumo específico de energia, devido à reduzida dimensão do sistema
  - Extensão elevada do circuito de adução até à totalidade das herdades da Aquaterra (localização da EDAM na Comporta)
  - Necessidade de aquisição de terrenos que não pertencem à Aquaterra

- O valor específico de produção de água seria inferior no caso de se considerar um funcionamento em continuo, ao caudal nominal, durante 12 meses por ano.

Anexo 1.10 – Memória Descritiva do Projeto de Rega

Aquaterra

Memória descritiva e justificativa – Capítulos Rega

(versão consolidada)

Herdade da Murta e Monte Novo

Abril 2026

Nota: atualização áreas (versão 7)

PROREGA
ENGENHARIA, AGRICULTURA E SERVIÇOS, LDA.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 3
2. DISPONIBILIDADES HÍDRICAS 3
3. RESERVATÓRIOS DE REGULARIZAÇÃO - CHARCAS 4
3.1. CAPTAÇÕES E ABASTECIMENTO DAS CHARCAS A PARTIR DOS FUROS 5
4. SISTEMA DE APLICAÇÃO DE REGA GOTA A GOTA 5
5. TURNOS E SETORES DE REGA 6
6. REDE DE REGA – CONDUTAS DE REGA 6
7. CABEÇAIS DE ELECTROVÁLVULAS 7
8. CABEÇAIS DE REGA 8
8.1. CABEÇAIS DE REGA 9
8.2. ÓRGÃOS DE CONTROLO GERAL E MEDIÇÃO 10
8.3. SISTEMA DE FILTRAGEM 10
8.4. EQUIPAMENTOS DE FERTIRREGA 11
9. AUTOMATIZAÇÃO 12
11. ESTAÇÕES DE BOMBAGEM 12

1. Introdução

Neste documento apresenta-se a descrição das infraestruturas de regadio para equipar um pomar de citrinos nas Herdade de Murta e Monte Novo.

O projeto divide-se em 3 áreas de regadio (designadas por Fincas) independentes abrangendo uma área de plantação útil de **295.2** hectares.

Cada área terá um sistema de rega localizada gota-a-gota independente. O abastecimento de cada sistema de rega far-se-á a partir de reservatórios de regularização (charcas impermeabilizadas) a contruir, uma por cada uma das três áreas, que, por sua vez, serão reabastecidas exclusivamente a partir de captações subterrâneas (furos) a efetuar.

2. Disponibilidades hídricas

As disponibilidades hídricas são garantidas a partir de 12 captações subterrâneas a efetuar com caudais de exploração indicados no Quadro 1.

A cada área são associados os respetivos furos que se encontram nas proximidades assim definidos no Quadro 1. Será feita uma bombagem direta dos furos para o respetivo reservatório.

Quadro 1- Captações Subterrâneas

Denominação da área	Furo	Caudal estimado (l/s)
Finca 1	Furo 1	30
	Furo 2	30
	Furo 3	29
	Furo 4	30
Finca 2	Furo 5	30
	Furo 6	25
	Furo 7	30
	Furo 8	48
Finca 3	Furo 9	49
	Furo 10	36
	Furo 11	30
	Furo 12	30

3. Reservatórios de regularização - charcas

A construção de charcas irá permitir o armazenamento e regularização dos caudais provenientes das captações subterrâneas de forma a conseguir um caudal unitário adequado aos sistemas de rega e salvaguardar eventuais avarias em bombagem nas captações.

Em função do volume de água máximo consumido por dia, no mês de ponta de necessidades hídricas, definiu-se um armazenamento capaz de satisfazer esse volume sem reabastecimento do respetivo reservatório por um período de 4 a 5 dias no mês de ponta.

Apresentam-se no Quadro 3 os caudais de exploração em cada área e uma estimativa de volumes de água armazenados.

Quadro 3- Estimativa dos volumes e caudais necessários

	FINCA 1	FINCA 2	FINCA 3
Pluviometria do sistema (mm/h)	1.6	1.6	1.6
Área Útil (ha)	100.0	94.1	101.1
Nº de Turnos de Rega	4	4	4
Área de Cada Turno de Rega (ha)	25.0	23.5	25.3
Caudal por Turno de Rega (m3/h)	400.0	376.4	404.4
Caudal por Turno de Rega (l/s)	111.1	104.6	112.3
Nº Máximo horas Rega Diárias (h)	10.6	10.6	10.6
Nº horas Máximo Rega Diário por Turno (h)	2.7	2.7	2.7
Dotação Diária (l/planta/dia)	76	76	76
Número de Furos	4.0	4.0	4.0
Caudal Médio de Exploração Furos (l/s)	29.8	33.3	36.3
Nº máximo diário de horas bombagem Furos	9.9	8.3	8.2
Volume máximo consumido diariamente (m3)	4240	3990	4287
Volume máximo consumido em 5 dias (m3)	21200	19949	21433
Volume armazenado em charca (m2)	35000	35000	35000

Os reservatórios a construir serão de formato trapezoidal, escavados no terreno, com taludes de inclinação do tipo 1:3 sendo impermeabilizado com geomembrana PEAD de 1,5 mm sobre capa de geotêxtil de poliéster 150g/m2.

Na saída de água das charcas serão utilizadas condutas de PEAD, enterradas, de forma a garantir uma adução em carga a cada estação de bombagem.

Procurou-se localizar os reservatórios em locais centrais face à área a que cada um está associado, em cotas mais elevadas, de forma a permitir um desnível favorável às estações de bombagem respetivas, e, simultaneamente, evitar escavações pronunciadas que possam atingir níveis freáticos.

3.1. Captações e abastecimento das charcas a partir dos furos

Cada captação subterrânea será equipada com uma eletrobomba submersível. À superfície, em cada uma, será instalado um cabeçal de controlo e automatização, constituído por um caudalímetro que controla o regime de funcionamento da bomba de forma a ajustar o caudal de extração às variações do nível hidrodinâmico. De cada furo até à charca respetiva o transporte da água far-se-á através de tubagens de PVC-U. Estas terão enterradas em valas com 1,0 m de profundidade por 0,6 m de largura.

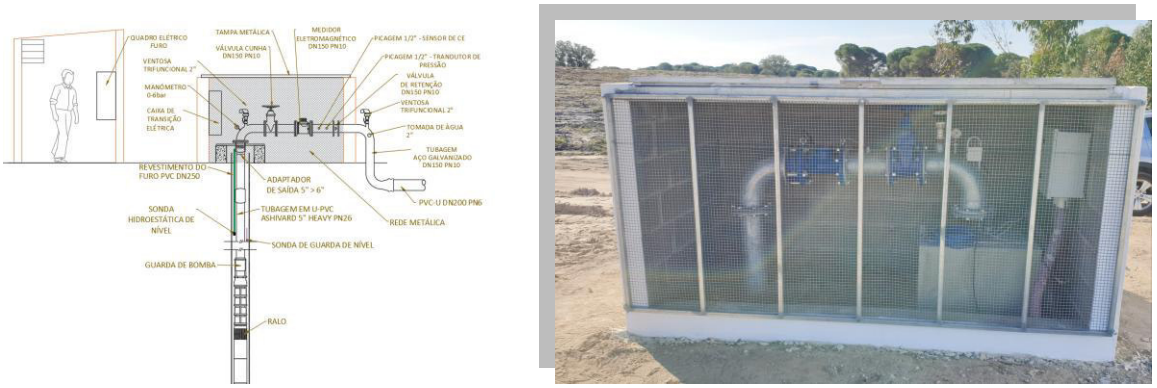


Figura 1- Captações Subterrâneas.

4. Sistema de aplicação de rega gota a gota

Por cada linha de plantação do pomar serão instaladas três laterais de gotejadores com gotejadores integrados de débito 1,6 l/h espaçados a 0,5.

No primeiro ano de plantação as árvores serão abastecidas a partir de um lateral de rega (central). Posteriormente instalar-se-ão as restantes dois laterais de rega paralelos ao primeiro quando as necessidades de água aumentarem. Assim, promover-se-á a redução de perdas de água no ano de instalação da cultura.

De referir que para a condução da rega serão instaladas sondas de controlo contínuo do teor de humidade do solo, bem como estação meteorológica de forma a contribuir para uma boa decisão do quanto, quando e como regar.

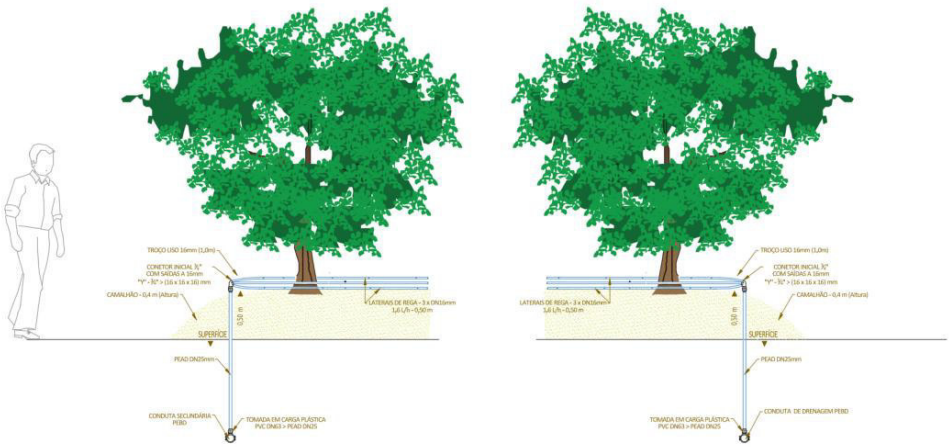


Figura 2- Laterais de rega gota-a-gota.

Todos laterais de rega a instalar serão constituídos por tubagem PEBD PN4 de DN16 mm.

As condutas secundárias serão de PEBD e a ligação à superfície aos laterais de rega far-se-á através de tubagem 25mm.

5. Turnos e setores de rega

Cada área será subdividida em setores de rega com cerca de 2,5 hectares casa. Cada setor é operado por uma única eletroválvula controlada pelo programador de rega. Em simultâneo poderá regar cerca de 25% da área total o que perfaz um turno de rega. Cada turno de rega deverá funcionar com cerca de 2,7 horas diárias o que perfaz um tempo de rega diário máximo de 10,6 horas em período de ponta, para a totalidade dos 4 turnos de rega existentes em cada área.

Sendo um turno de rega um conjunto de sectores que regam em simultâneo, um sector é formado por um bloco ou vários blocos de rega e é controlado por uma única electroválvula. Os setores de rega terão áreas compreendidas entre 1,5 e 2,7 hectares.

Estão previstos 44 setores de rega para a Finca 1, 44 setores para a Finca 2 e 48 setores para a Finca 3.

6. Rede de rega – Condutas de rega

A rede de rega afeta ao sistema gota a gota será formada pelas condutas principais, condutas secundárias, condutas de drenagem e laterais de rega (com gotejadores integrados).

As condutas principais ligam o cabeçal de rega de cada área às respetivas eletroválvulas de setor e serão de PVC-U com diâmetros desde DN400 até DN63. Serão instaladas em valas com profundidade variável entre 1,3 e 1,0 m e de largura entre 0,8 e 0,6 m.

As condutas secundárias e de drenagem, estas instaladas no final das linhas de forma a facilitar a limpeza das mesmas, serão de PEBD e instaladas em valas com profundidade de 1,0 m e largura de 0,6m.

7. Cabeçais de electroválvulas

A abertura de um sector de rega faz-se através de cabeçais de electroválvulas.

Cada cabeçal de electroválvulas afeto ao sistema de rega gota a gota será constituído por:

- Uma electroválvula em PE de 3" PN10 roscada, provida de regulador de pressão plástico com circuito de três vias.
- Pressostato de controlo, instalado a jusante da electroválvula de forma a monitorar a partir do programador de rega a abertura e fecho da electroválvula;
- Nos cabeçais de eletroválvulas mais desfavoráveis de pressão, serão instalados dois transdutores de pressão, por, a montante das electroválvulas de forma a controlar a pressão disponibilizada;
- Ventosa trifuncional em PE de 2" PN10, seccionada a montante por intermédio de uma válvula de esfera metálica de 2", de forma a proteger a rede principal;
- Ventosa cinética em PE de 2" PN10, seccionada a montante por intermédio de uma válvula de esfera metálica de 2", de forma a proteger as condutas secundárias, laterais de gotejadores e medidor volumétrico;

- Válvula de cunha elástica metálica, flangeada de 2" PN10, de forma a permitir seccionar o cabeçal caso seja necessário efetuar uma intervenção/reparação no cabeçal de eletroválvulas;

- Manómetro de ¼ em câmara húmida de glicerina, instalado a jusante da electroválvula de forma a conhecer-se a pressão a jusante da mesma, com escala de medição 0 – 4 bar;

8. Cabeçais de Rega

Serão instalados três cabeçais de rega, um por cada zona de rega, conforme planta tipo que se apresenta na figura 4.

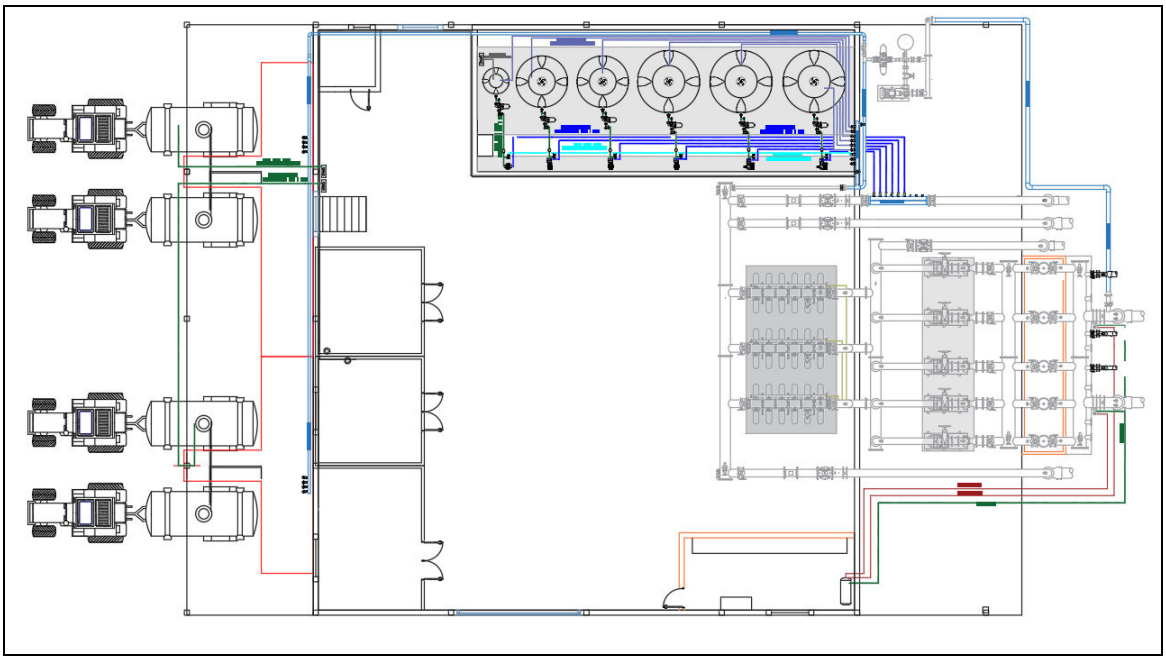


Figura 3 – Cabeçal de Rega – Planta Tipo.

Os cabeçais de rega localizar-se-ão em armazéns a construir, e serão constituídos pelas estações de bombagem, sistemas de filtragem, sistemas de fertirrega, sistemas de medição, sistemas de automatização, orgãos de controlo geral, orgãos de controlo de ramais de abastecimento e por alguns elementos de proteção, seccionamento e regulação.

8.1. Cabeçais de Rega

De forma a permitir a manutenção/intervenção dos órgãos de cada cabeçal de rega serão instaladas válvulas de seccionamento de borboleta e cunha elástica.

Para proteção dos elementos do cabeçal de rega dos golpes de ariete e do refluxo de fertilizante no ramal afeto à gota a gota, será instalada válvula de retenção bipartida.

A jusante de cada grupo de bombagem será instalada uma válvula de retenção bipartida, de forma a, por um lado, proteger o grupo de bombagem dos golpes de ariete e, por outro lado, evitar o refluxo de caudal caso um determinado grupo de bombagem não funcione e o(s) outro(s) esteja(m) em funcionamento.

Serão também instaladas ventosas trifuncionais metálicas flangeadas DN80 PN10 e em PE de 2" PN10, de forma a proteger os elementos e as tubagens nos períodos de arranque, paragem e funcionamento da rega, que serão seccionadas através de válvulas de borboleta com desmultiplicador de volante DN80 PN10 e válvulas de esfera metálica, respetivamente as ventosas de 3" e 2".

Será instalada uma válvula hidráulica de alívio rápido, por cabeçal de rega, no coletor de compressão de receção do caudal dos grupos de bombagem, de forma a proteger os órgãos do cabeçal de rega e/ou rede de rega de uma situação de rotura. Esta situação poderá acontecer caso não ocorra a abertura de sectores com o(s) grupo(s) de bombagem em funcionamento, colmatação do sistema de filtragem, fecho acidental de uma válvula manual de seccionamento e não ocorra a paragem do(s) grupo de bombagem por ordem do pressostato de máximo.

No coletor de compressão dos grupos de bombagem será instalado um pressostato de pressão máxima, com ligação aos quadros elétricos de modo a inibir o funcionamento de todo sistema de rega e assim evitar rotura dos órgãos do cabeçal de rega e/ou rede de rega.

Serão instalados pressostatos de pressão mínima de forma a inibir o funcionamento do sistema de rega, numa situação em que a pressão verificada, seja insuficiente para garantir uma rega eficaz, uniforme e eficiente. Estas condições poderão ocorrer caso não se verifique o funcionamento dos grupos de bombagem, falta de água na charca, rotura nas condutas de ligação da charca ao cabeçal de rega, roturas na rede de

rega, obstrução do sistema de filtragem e no caso do pressostato afeto ao sistema de rega gota a gota, poderá também se se verificar mais setores abertos face ao programado.

Para leitura da pressão através dos programadores de rega, será instalado por ramal de abastecimento um transdutor de pressão de leitura, com ligação ao programador de rega de forma monitorizar-se o correto funcionamento do sistema de rega e assim garantir elevados padrões na qualidade da aplicação da água.

A jusante do local de injeção de fertilizante, no ramal afeto ao sistema de rega gota a gota será instalado um sensor de pH com transmissor e um sensor de CE com transmissor com ligação ao programador de rega, de forma a controlar os seus valores a partir do programador de rega e assim ajustar a quantidade de fertilizante estreitamente necessário para o desenvolvimento da cultura, contribuindo desta forma para uso sustentável dos fatores de produção.

8.2. Órgãos de controlo geral e medição

Por ramal de abastecimento a partir da charca ao cabeçal de rega, será instalada uma válvula de borboleta de controlo geral, de forma a evitar eventuais perdas de água, quer ao nível dos ramais de abastecimento, quer ao nível do sistema de filtragem.

Por ramal de abastecimento será instalado um medidor de caudal eletromagnético de elevada precisão de leitura de forma a contabilizador os volumes exatos consumidos em ambos os sistemas de rega. Os medidores de caudal serão providos com visor de caudal e outros parâmetros, com ligação ao programador de rega. Desta forma consegue-se por um lado contabilizar os volumes efetivamente consumidos pela cultura e por outro lado, monitorizar à distância através do programador de rega, os caudais e volumes consumidos.

8.3. Sistema de Filtragem

As filtragens serão de anéis plásticos, de limpeza automática, com um grau de filtragem de 130 mícrones de elevada capacidade de forma a mitigar o número de limpezas necessárias efetuar e assim contribuir para o uso eficiente da água consumida nas limpezas.

A limpeza do sistema de filtragem será controlada pelo programador de rega. Para o controlo da limpeza das baterias de filtragem será instalado um sensor de pressão no coletor de admissão das baterias de filtragem (Pressão Máxima) e outro sensor no coletor de receção das baterias de filtragem (Pressão Mínima).

8.4. Equipamentos de Fertirrega

Os sistemas de fertirrega ficarão serão também completamente automáticos, controlados a partir do programador de rega e serão formados por:

- depósitos em PE, com parede reforçada, graduados com tampa de enchimento;
- bombas doseadoras de membrana, de regulação manual;
- bombas doseadoras centrifugas com cuba em inox;

- sistemas misturadores mecânicos por depósito;
- medidor volumétrico de 1" de produtos químicos, com emissor de impulsos, por cada depósito;
- válvula de retenção em PE de 11/2" por depósito;
- sistema de limpeza automática individualizado por depósito.

Todos os componentes do sistema de fertirrega serão instalados com tubagens eletrosoldadas de forma a reduzir eventuais derrames. O sistema de injecção, permite o doseamento proporcional e o controlo rigoroso das concentrações de adubo aplicados. Todo o sistema será instalado numa bacia de retenção capaz de reter derrames em caso de rotura de qualquer equipamento de armazenamento ou transporte.



Figura 4 – Elementos do sistema de fertirrega.

9. Automatização

A abertura e fecho de sectores é assegurado por electroválvulas equipadas com solenoides de baixo consumo segundo especificações do fabricante para sistema de controlo por monocabo, controlados por um único programador de rega, controlo e programação à distância.

Todo o controlo do sistema, arranque, setorização, programação de horários de rega, sistema de fertirrega, deteção de avarias, monitorização de pressões e caudais, será concentrado no programador de rega acessível à distância pelo gestor do sistema. Para além do controlo permite o registo de dados de funcionamento de apoio à gestão do mesmo.

11. Estações de bombagem

As estações de bombagem serão constituídas por grupos de bombagem superficiais de eixo horizontal, comuns aos dois sistemas de aplicação de água (controlados a partir do programador de rega).

Os grupos de bombagem ficarão em carga, sendo o coletor de aspiração ligado ao fundo do respetivo reservatório através de uma tubagem de PEAD.

Todos os grupos de bombagem serão providos de quadros elétricos com variador de frequência, de forma a otimizar os consumos de energia à diferente demanda de caudal e pressão que possa ser necessária para cada sistema.

Para as captações estima-se uma potência de bombagem de 45 kW para cada furo, o que perfaz um total de 540 kW para a totalidade dos 12 furos.

Apresenta-se no Quadro 5 as potências de bombagem e outras associadas às casas de rega:

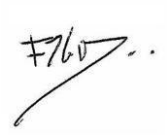
Quadro 5- Potências nas casas de rega

Potências para Casas Rega - Herdade da Murta e Monte Novo												
Área (Finca)	Área regada (ha)	Caudal do Sistema Rega (m3/h)	Caudal de projeto (m3/h)	Nº de grupos de bombagem	Caudal por grupo de bombagem (m3/h)	Altura Manométrica (mca)	Potência por grupo de bombagem (KW)	Potência por cabeçal de Bombagem (kW)	Fertirrega (kW)	Tomadas e iluminação (kW)	Outro Consumos (kw)	Potencia Total (kW)
1	**100**	**402**	523	3	**174**	**60**	45	**135**	14.5	5.5	10	**165**
2	**94.1**	**378**	491	3	**164**	**50**	37	**111**	14.5	5.5	10	**141**
3	**101.1**	**406**	528	3	**176**	**60**	45	**135**	14.5	5.5	10	**165**
										TOTAL		**471**

POTÊNCIAS DE BOMBAGEM NOS DOS FUROS				
Furo	Caudal por furo (m3/h)	H (mca)	Potência por grupo (kW)	Potência Total
1 a 12	126	100	45	540

Beja, 09 de Maio de 2026

Fernando Nunes (Engº. Agrónomo)



João Mendes (Engº. Agrónomo)



Prorega - Engenharia, Agricultura e Serviços, Lda
Rua Zeca Afonso º6, 1ºB 7800 - 522 Beja
prorega@prorega.pt www.prorega.pt

Anexo 1.11 – Inventário florístico da área de estudo

Quadro 1 - Elenco florístico da área de estudo (Ocorrência: X – potencial, C – confirmado; Exótica: X – exótica, I - invasora)

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Aizoaceae	*Carpobrotus edulis*	C	I
Alismataceae	*Alisma lanceolatum*	X	
Alismataceae	*Alisma plantago-aquatica*	X	
Amaranthaceae	*Arthrocnemum macrostachyum*	X	
Amaranthaceae	*Atriplex halimus*	X	
Amaranthaceae	*Atriplex prostrata*	C	
Amaranthaceae	*Beta maritima*	X	
Amaranthaceae	*Chenopodium album*	C	
Amaranthaceae	*Chenopodium chenopodioides*	X	
Amaranthaceae	*Halimione portulacoides*	X	
Amaranthaceae	*Salsola kali*	X	
Amaranthaceae	*Sarcocornia perennis*	X	
Amaranthaceae	*Suaeda vera*	C	
Amaryllidaceae	*Allium porrum*	C	X
Amaryllidaceae	*Allium sphaerocephalon*	C	
Amaryllidaceae	*Leucojum trichophyllum*	X	
Anacardiaceae	*Pistacia lentiscus*	C	
Apiaceae	*Caropsis verticillato-inundata*	X	
Apiaceae	*Daucus carota*	C	
Apiaceae	*Hydrocotyle vulgaris*	X	
Apiaceae	*Margotia gummifera*	X	
Apiaceae	*Pimpinella villosa*	X	
Apiaceae	*Prangos trifida*	C	
Apiaceae	*Thapsia villosa*	C	
Apocynaceae	*Nerium oleander*	C	
Araceae	*Arisarum simorrhinum*	C	
Araceae	*Zantedeschia aethiopica*	C	X
Araliaceae	*Hedera hibernica*	C	
Asparagaceae	*Agave americana*	C	I
Asparagaceae	*Asparagus acutifolius*	X	
Asparagaceae	*Asparagus aphyllus*	C	
Asparagaceae	*Dipcadi serotinum*	X	
Asparagaceae	*Scilla monophyllos*	X	
Asparagaceae	*Urginea maritima*	C	
Asparagaceae	*Yucca sp.*	C	X
Asteraceae	*Aetheorhiza bulbosa*	C	
Asteraceae	*Anacyclus radiatus*	X	
Asteraceae	*Andryala arenaria*	C	
Asteraceae	*Andryala integrifolia*	C	
Asteraceae	*Arctium minus*	C	

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Asteraceae	*Arctotheca calendula*	X	I
Asteraceae	*Calendula arvensis*	C	
Asteraceae	*Carlina hispanica*	C	
Asteraceae	*Carlina racemosa*	X	
Asteraceae	*Carthamus lanatus*	C	
Asteraceae	*Centaurea sphaerocephala*	X	
Asteraceae	*Chamaemelum fuscatum*	X	
Asteraceae	*Chamaemelum mixtum*	C	
Asteraceae	*Chondrilla juncea*	C	
Asteraceae	*Cichorium intybus*	C	
Asteraceae	*Conyza bonariensis*	C	I
Asteraceae	*Cotula coronopifolia*	X	X
Asteraceae	*Crepis vesicaria*	C	
Asteraceae	*Dittrichia viscosa*	C	
Asteraceae	*Hedypnois cretica*	X	
Asteraceae	*Helichrysum italicum*	C	
Asteraceae	*Helichrysum stoechas*	C	
Asteraceae	*Hypochaeris glabra*	C	
Asteraceae	*Hypochaeris radicata*	X	
Asteraceae	*Inula crithmoides*	X	
Asteraceae	*Lactuca serriola*	C	
Asteraceae	*Logfia gallica*	X	
Asteraceae	*Logfia minima*	X	
Asteraceae	*Picris echioides*	C	
Asteraceae	*Pseudognaphalium luteo-album*	C	
Asteraceae	*Pulicaria odora*	X	
Asteraceae	*Pulicaria paludosa*	X	
Asteraceae	*Reichardia gaditana*	X	
Asteraceae	*Reichardia picroides*	X	
Asteraceae	*Santolina impressa*	C	
Asteraceae	*Senecio gallicus*	X	
Asteraceae	*Senecio jacobaea*	C	
Asteraceae	*Senecio vulgaris*	C	
Asteraceae	*Solidago virgaurea*	C	
Asteraceae	*Sonchus oleraceus*	C	
Asteraceae	*Tolpis barbata*	C	
Boraginaceae	*Anchusa undulata*	X	
Boraginaceae	*Echium tuberculatum*	X	
Boraginaceae	*Heliotropium europaeum*	X	
Boraginaceae	*Lithodora prostrata*	X	
Boraginaceae	*Myosotis welwitschii*	X	
Brassicaceae	*Brassica barrelieri*	C	

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Brassicaceae	*Brassica oxyrrhina*	X	
Brassicaceae	*Cardamine hirsuta*	X	
Brassicaceae	*Diplotaxis catholica*	X	
Brassicaceae	*Iberis ciliata subsp. welwitschii*	X	
Brassicaceae	*Jonopsidium acaule*	X	
Brassicaceae	*Malcolmia littorea*	X	
Brassicaceae	*Raphanus raphanistrum*	C	
Brassicaceae	*Teesdalia coronopifolia*	X	
Cactaceae	*Opuntia ficus-indica*	C	I
Campanulaceae	*Jasione montana*	C	
Campanulaceae	*Lobelia urens*	X	
Caprifoliaceae	*Lonicera periclymenum*	X	
Caryophyllaceae	*Chaetonychia cymosa*	X	
Caryophyllaceae	*Dianthus broteri*	C	
Caryophyllaceae	*Herniaria maritima*	C	
Caryophyllaceae	*Loeflingia baetica*	X	
Caryophyllaceae	*Paronychia argentea*	C	
Caryophyllaceae	*Polycarpon tetraphyllum*	X	
Caryophyllaceae	*Silene colorata*	X	
Caryophyllaceae	*Silene gallica*	C	
Caryophyllaceae	*Silene latifolia*	C	
Caryophyllaceae	*Silene littorea*	X	
Caryophyllaceae	*Silene portensis*	X	
Caryophyllaceae	*Silene psammitis subsp. psammitis*	X	
Caryophyllaceae	*Silene scabriflora*	X	
Caryophyllaceae	*Spergula arvensis*	X	
Caryophyllaceae	*Spergularia purpurea*	X	
Cistaceae	*Cistus albidus*	X	
Cistaceae	*Cistus crispus*	X	
Cistaceae	*Cistus populifolius*	C	
Cistaceae	*Cistus psilosepalus*	C	
Cistaceae	*Cistus salviifolius*	C	
Cistaceae	*Halimium calycinum*	C	
Cistaceae	*Halimium halimifolium*	C	
Cistaceae	*Halimium lasianthum*	C	
Cistaceae	*Halimium ocymoides*	C	
Cistaceae	*Halimium umbellatum*	C	
Cistaceae	*Tuberaria guttata*	X	
Convolvulaceae	*Calystegia sepium*	X	
Convolvulaceae	*Ipomoea indica*	C	I
Crassulaceae	*Sedum hirsutum*	C	
Crassulaceae	*Sedum sediforme*	X	

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Crassulaceae	*Umbilicus rupestris*	C	
Cupressaceae	*Juniperus navicularis*	C	
Cyperaceae	*Bolboschoenus maritimus*	X	
Cyperaceae	*Carex paniculata*	X	
Cyperaceae	*Carex pendula*	X	
Cyperaceae	*Carex pseudocyperus*	X	
Cyperaceae	*Cyperus difformis*	X	
Cyperaceae	*Cyperus eragrostis*	X	X
Cyperaceae	*Fuirena pubescens*	X	
Cyperaceae	*Rhynchospora modesti-lucennoi*	X	
Cyperaceae	*Scirpoides holoschoenus*	C	
Cytinaceae	*Cytinus hypocistis*	C	
Dennstaedtiaceae	*Pteridium aquilinum*	C	
Dipsacaceae	*Pterocephalidium diandrum*	X	
Dipsacaceae	*Pycnocomon rutifolium*	X	
Droseraceae	*Drosera intermedia*	X	
Ericaceae	*Arbutus unedo*	C	
Ericaceae	*Corema album*	C	
Ericaceae	*Erica arborea*	C	
Ericaceae	*Erica ciliaris*	X	
Ericaceae	*Erica cinerea*	C	
Ericaceae	*Erica erigena*	X	
Ericaceae	*Erica umbellata*	C	
Euphorbiaceae	*Euphorbia boetica*	X	
Euphorbiaceae	*Euphorbia characias*	X	
Euphorbiaceae	*Euphorbia esula*	X	
Euphorbiaceae	*Euphorbia exigua*	X	
Euphorbiaceae	*Euphorbia portlandica*	X	
Euphorbiaceae	*Euphorbia segetalis*	X	
Fabaceae	*Acacia dealbata*	C	I
Fabaceae	*Acacia longifolia*	C	I
Fabaceae	*Acacia melanoxylon*	C	I
Fabaceae	*Acacia saligna*	C	I
Fabaceae	*Astragalus pelecinus*	X	
Fabaceae	*Ceratonia siliqua*	X	
Fabaceae	*Coronilla glauca*	X	
Fabaceae	*Cytisus grandiflorus subsp. cabezudoi*	C	
Fabaceae	*Genista ancistrocarpa*	X	
Fabaceae	*Genista triacanthos*	X	
Fabaceae	*Hymenocarpos hamosus*	X	
Fabaceae	*Lupinus angustifolius*	X	
Fabaceae	*Medicago marina*	X	

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Fabaceae	*Medicago polymorpha*	C	
Fabaceae	*Ononis broteriana*	X	
Fabaceae	*Ornithopus compressus*	X	
Fabaceae	*Retama sphaerocarpa*	C	
Fabaceae	*Robinia pseudoacacia*	C	I
Fabaceae	*Spartium junceum*	X	X
Fabaceae	*Stauracanthus genistoides*	C	
Fabaceae	*Trifolium angustifolium*	X	
Fabaceae	*Trifolium arvense*	X	
Fabaceae	*Trifolium campestre*	X	
Fabaceae	*Trifolium repens*	C	
Fabaceae	*Ulex australis subsp. welwitschianus*	C	
Fabaceae	*Ulex minor*	C	
Fagaceae	*Quercus coccifera*	X	
Fagaceae	*Quercus faginea*	X	
Fagaceae	*Quercus lusitanica*	C	
Fagaceae	*Quercus robur*	X	
Fagaceae	*Quercus suber*	C	
Gentianaceae	*Centaurium erythraea*	C	
Geraniaceae	*Erodium cicutarium*	X	
Geraniaceae	*Erodium moschatum*	C	
Geraniaceae	*Geranium molle*	C	
Hypericaceae	*Hypericum perforatum*	C	
Iridaceae	*Crocus serotinus*	X	
Juncaceae	*Juncus acutiflorus*	X	
Juncaceae	*Juncus capitatus*	X	
Juncaceae	*Juncus conglomeratus*	C	
Juncaceae	*Juncus effusus*	C	
Juncaceae	*Juncus rugosus*	X	
Juncaceae	*Juncus subnodulosus*	X	
Lamiaceae	*Lamium amplexicaule*	X	
Lamiaceae	*Lavandula pedunculata*	C	
Lamiaceae	*Lavandula stoechas*	X	
Lamiaceae	*Lycopus europaeus*	X	
Lamiaceae	*Mentha suaveolens*	C	
Lamiaceae	*Origanum vulgare*	X	
Lamiaceae	*Rosmarinus officinalis*	C	
Lamiaceae	*Thymus capitellatus*	C	
Lamiaceae	*Thymus carnosus*	X	
Lauraceae	*Laurus nobilis*	C	
Lentibulariaceae	*Utricularia gibba*	X	
Liliaceae	*Fritillaria lusitanica*	X	

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Linaceae	*Linum bienne*	X	
Linaceae	*Radiola linoides*	X	
Lythraceae	*Lythrum salicaria*	C	
Malvaceae	*Lavatera cretica*	C	
Moraceae	*Ficus carica*	C	
Moraceae	*Morus alba*	C	X
Myricaceae	*Myrica gale*	X	
Myrtaceae	*Eucalyptus globulus*	C	X
Myrtaceae	*Myrtus communis*	C	
Nyctaginaceae	*Mirabilis jalapa*	C	X
Nymphaeaceae	*Nuphar luteum*	X	
Nymphaeaceae	*Nymphaea alba*	C	
Oleaceae	*Olea europaea var. europaea*	C	
Oleaceae	*Phillyrea angustifolia*	C	
Orchidaceae	*Neotinea maculata*	X	
Orchidaceae	*Serapias strictiflora*	X	
Orobanchaceae	*Cistanche phelypaea*	X	
Orobanchaceae	*Orobanche ramosa*	C	
Oxalidaceae	*Oxalis pes-caprae*	X	I
Papaveraceae	*Papaver rhoeas*	X	
Phytolaccaceae	*Phytolacca americana*	C	I
Pinaceae	*Pinus pinaster*	C	
Pinaceae	*Pinus pinea*	C	
Plantaginaceae	*Anarrhinum bellidifolium*	C	
Plantaginaceae	*Digitalis purpurea*	X	
Plantaginaceae	*Linaria spartea*	C	
Plantaginaceae	*Linaria viscosa subsp. viscosa*	X	
Plantaginaceae	*Plantago coronopus*	X	
Plantaginaceae	*Plantago lanceolata*	C	
Plumbaginaceae	*Armeria rouyana*	C	
Plumbaginaceae	*Limonium ferulaceum*	X	
Plumbaginaceae	*Limonium lanceolatum*	X	
Plumbaginaceae	*Limonium vulgare*	X	
Poaceae	*Agrostis stolonifera*	C	
Poaceae	*Agrostis tenerrima*	X	
Poaceae	*Aira caryophyllea*	X	
Poaceae	*Arrhenatherum album*	C	
Poaceae	*Arundo donax*	C	I
Poaceae	*Avena barbata*	C	
Poaceae	*Avena longiglumis*	X	
Poaceae	*Brachypodium phoenicoides*	X	
Poaceae	*Briza maxima*	X	

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Poaceae	*Bromus rigidus*	X	
Poaceae	*Corynephorus canescens*	C	
Poaceae	*Cynodon dactylon*	C	
Poaceae	*Cynosurus echinatus*	C	
Poaceae	*Dactylis glomerata*	C	
Poaceae	*Ehrharta calycina*	X	X
Poaceae	*Hordeum murinum*	C	
Poaceae	*Lagurus ovatus*	C	
Poaceae	*Micropyrum tenellum*	X	
Poaceae	*Oryza sp.*	C	X
Poaceae	*Panicum repens*	X	
Poaceae	*Phragmites australis*	C	
Poaceae	*Piptatherum miliaceum*	C	
Poaceae	*Spartina maritima*	C	
Poaceae	*Vulpia alopecuros*	C	
Poaceae	*Vulpia membranacea*	X	
Polygonaceae	*Polygonum aviculare*	X	
Polygonaceae	*Polygonum equisetiforme*	X	
Polygonaceae	*Polygonum persicaria*	C	
Polygonaceae	*Rumex acetosa*	X	
Polygonaceae	*Rumex acetosella*	C	
Polygonaceae	*Rumex bucephalophorus*	X	
Polygonaceae	*Rumex conglomeratus*	X	
Polygonaceae	*Rumex crispus*	X	
Portulacaceae	*Portulaca oleracea*	X	
Primulaceae	*Anagallis monelli*	X	
Primulaceae	*Anagallis tenella*	X	
Primulaceae	*Asterolinon linum-stellatum*	X	
Ranunculaceae	*Ranunculus sceleratus*	X	
Resedaceae	*Sesamoides purpurascens*	X	
Resedaceae	*Sesamoides spathulifolia*	X	
Rhamnaceae	*Frangula alnus*	X	
Rosaceae	*Eriobotrya japonica*	C	X
Rosaceae	*Potentilla erecta*	X	
Rosaceae	*Rosa canina*	C	
Rosaceae	*Rubus ulmifolius*	C	
Rutaceae	*Citrus x limon*	C	X
Rutaceae	*Citrus x sinensis*	C	X
Salicaceae	*Salix atrocinerea*	C	
Scrophulariaceae	*Scrophularia auriculata*	X	
Scrophulariaceae	*Scrophularia frutescens*	X	
Scrophulariaceae	*Scrophularia sublyrata*	C	

Família	Nome Científico	Ocorrência	Exótica
Scrophulariaceae	*Verbascum litigiosum*	C	
Scrophulariaceae	*Verbascum sinuatum*	X	
Smilacaceae	*Smilax aspera*	X	
Solanaceae	*Datura stramonium*	C	I
Solanaceae	*Solanum nigrum*	C	
Tamaricaceae	*Tamarix africana*	X	
Thelypteridaceae	*Thelypteris palustris*	X	
Thymelaeaceae	*Daphne gnidium*	C	
Typhaceae	*Typha latifolia*	C	
Valerianaceae	*Centranthus calcitrapae*	C	
Verbenaceae	*Lantana camara*	C	I
Vitaceae	*Vitis vinifera*	C	
Zosteraceae	*Zostera noltii*	X	

Quadro 2 - Lista das espécies de anfíbios e répteis elencados para a área de estudo. (Ocorrência: X – potencial; C - confirmada. Estatuto de conservação em Portugal, de acordo com o Livro Vermelho [Cabral et al., 2006]: LC – Pouco preocupante; NE – Não avaliada; NT – Quase ameaçada).

Família	Nome científico	Nome vulgar	Ocorrência	Convenções/ Decreto-Lei		Estatuto de Conservação
				Berna	D.L. 140/99	
Bufonidae	*Bufo bufo*	Sapo-comum	X	III		LC
Bufonidae	*Epidalea calamita*	Sapo-corredor	X	II	B-IV	LC
Hylidae	*Hyla arborea*	Rela-comum	X	II	B-IV	LC
Hylidae	*Hyla meridionalis*	Rela-meridional	X	II	B-IV	LC
Pelobatidae	*Pelobates cultripes*	Sapo-de-unha-negra	X	II	B-IV	LC
Ranidae	*Pelophylax perezi*	Rã-verde	X	III	B-V	LC
Salamandridae	*Pleurodeles waltl*	Salamandra-de-costelas-salientes	X	III		LC
Salamandridae	*Salamandra salamandra*	Salamandra-de-pintas-amarelas	X	III		LC
Salamandridae	*Triturus marmoratus*	Tritão-marmorado	X	III	B-IV	LC
Colubridae	*Coronella girondica*	Cobra-lisa-meridional	X	III		LC
Colubridae	*Rhinechis scalaris*	Cobra-de-escada	X	III		LC
Lacertidae	*Acanthodactylus erythrurus*	Lagartixa-de-dedos-denteados	X	III		NT
Lacertidae	*Psammodromus algirus*	Lagartixa-do-mato	X	III		LC
Lacertidae	*Psammodromus hispanicus*	Lagartixa-do-mato-ibérica	X	III		NT
Natricidae	*Natrix maura*	Cobra-de-água-viperina	X	III		LC
Natricidae	*Natrix natrix*	Cobra-de-água-de-colar	X	III		LC
Phyllodactylidae	*Tarentola mauritanica*	Osga	X	III		LC
Psammophiidae	*Malpolon monspessulanus*	Cobra-rateira	X	III		LC
Scincidae	*Chalcides bedriagai*	Cobra-de-pernas-pentadáctila	X	II	B-IV	LC
Scincidae	*Chalcides striatus*	Fura-pastos	X	III		LC
Geoemydidae	*Mauremys leprosa*	Cágado-mediterrânico	X	II	B-II /B-IV	LC

Quadro 3 - Lista das espécies de aves elencadas para a área de estudo. (Ocorrência: X – potencial; C – confirmada. Estatuto de conservação em Portugal, de acordo com o Livro Vermelho [Cabral et al., 2006]: CR – Criticamente em Perigo, EN – Em Perigo, VU – Vulnerável, NT – Quase Ameaçado, LC – Pouco preocupante; DD – Informação Insuficiente)

Família	Nome científico	Nome vulgar	Ocorrência	Convenções/ Decreto-Lei				Estatuto de Conservação
				Berna	Bona	CITES	D.L. 140/99	
Phasianidae	*Coturnix coturnix*	Codorniz	X	III				LC
Phasianidae	*Alectoris rufa*	Perdiz	X	III				LC
Phasianidae	*Phasianus colchicus*	Faisão	X	III				
Anatidae	*Tadorna tadorna*	Pato-branco	X	II	II			NE
Anatidae	*Spatula clypeata*	Pato-colhereiro	X	III	II			EN/LC
Anatidae	*Mareca strepera*	Frisada	X	III	II			VU/NT
Anatidae	*Anas platyrhynchos*	Pato-real	C	III	II			LC
Anatidae	*Anas crecca*	Marrequinha	X	III	II			LC
Podicipedidae	*Tachybaptus ruficollis*	Mergulhão-pequeno	X	II				LC
Phoenicopteridae	*Phoenicopterus roseus*	Flamingo	C	III	II	II	A-I	RE/VU
Columbidae	*Columba livia*	Pombo-das-rochas	X	III				DD
Columbidae	*Columba palumbus*	Pombo-torcaz	C					LC
Columbidae	*Streptopelia turtur*	Rola-brava	X	III				LC
Columbidae	*Streptopelia decaocto*	Rola-turca	C	III				LC
Caprimulgidae	*Caprimulgus ruficollis*	Noitibó-de-nuca-vermelha	X	II				VU
Caprimulgidae	*Caprimulgus europaeus*	Noitibó-cinzento	X	II			A-I	VU
Apodidae	*Apus pallidus*	Andorinhão-pálido	X	II				LC
Apodidae	*Apus apus*	Andorinhão-preto	X	III				LC
Cuculidae	*Cuculus canorus*	Cuco	X	III				LC
Rallidae	*Rallus aquaticus*	Frango-d'água	X	III				LC
Rallidae	*Porphyrio porphyrio*	Camão	X	II			A-I*	VU
Rallidae	*Gallinula chloropus*	Galinha-d'água	X	III				LC
Rallidae	*Fulica atra*	Galeirão-comum	C	III				LC
Otididae	*Otis tarda*	Abetarda	X	II	I/II	II	A-I*	EN
Ciconiidae	*Ciconia ciconia*	Cegonha-branca	C	II	II		A-I	LC
Threskiornithidae	*Platalea leucorodia*	Colhereiro	X	II	II	II	A-I	VU/NT
Threskiornithidae	*Plegadis falcinellus*	Ibis-preta	X	II	II		A-I	RE
Ardeidae	*Ixobrychus minutus*	Garçote	X	II			A-I	VU
Ardeidae	*Nycticorax nycticorax*	Goraz	X	II			A-I	EN
Ardeidae	*Ardeola ralloides*	Papa-ratos	X	II			A-I	CR/EN
Ardeidae	*Bubulcus ibis*	Carraceiro	X	II				LC
Ardeidae	*Ardea cinerea*	Garça-real	C	III				LC
Ardeidae	*Ardea purpurea*	Garça-vermelha	X	II			A-I	EN
Ardeidae	*Egretta garzetta*	Garça-branca	C	II			A-I	LC
Sulidae	*Morus bassanus*	Alcatraz	X	III				LC
Phalacrocoracidae	*Phalacrocorax carbo*	Corvo-marinho	C	III				LC
Recurvirostridae	*Recurvirostra avosetta*	Alfaiate	X	II	II		A-I	NT/LC

Família	Nome científico	Nome vulgar	Ocorrência	Convenções/ Decreto-Lei				Estatuto de Conservação
				Berna	Bona	CITES	D.L. 140/99	
Recurvirostridae	*Himantopus himantopus*	Pernilongo	X	II	II		A-I	LC
Charadriidae	*Charadrius hiaticula*	Borrelho-grande-de-coleira	C	II	II			LC
Charadriidae	*Charadrius dubius*	Borrelho-pequeno-de-coleira	X	II	II			LC
Charadriidae	*Charadrius alexandrinus*	Borrelho-de-coleira-interrompida	X	II	II			LC
Scolopacidae	*Numenius arquata*	Maçarico-real	X	III	II			LC
Scolopacidae	*Limosa limosa*	Milherango	X	III	II			LC
Scolopacidae	*Calidris alpina*	Pilrito-de-peito-preto	X	II	II			LC
Scolopacidae	*Gallinago gallinago*	Narceja	X	III	II			CR/LC
Scolopacidae	*Actitis hypoleucos*	Maçarico-das-rochas	X	II	II			VU
Scolopacidae	*Tringa totanus*	Perna-vermelha	X	III	II			CR/LC
Glareolidae	*Glareola pratincola*	Perdiz-do-mar	X	II	II		A-I	VU
Laridae	*Larus ridibundus*	Guincho	X	III				LC
Laridae	*Larus fuscus*	Gaivota-de-asa-escura	X					VU/LC
Laridae	*Larus michahellis*	Gaivota-de-patas-amarelas	C	III				LC
Laridae	*Sternula albifrons*	Chilreta	X	II	II		A-I	VU
Tytonidae	*Tyto alba*	Coruja-das-torres	X	II		II		LC
Strigidae	*Athene noctua*	Mocho-galego	X	II		II		LC
Strigidae	*Otus scops*	Mocho-d'orelhas	X	II		II		DD
Strigidae	*Asio otus*	Bufo-pequeno	X	II		II		DD
Strigidae	*Asio flammeus*	Coruja-do-nabal	X	II		II	A-I	EN
Strigidae	*Strix aluco*	Coruja-do-mato	X	II		II		LC
Pandionidae	*Pandion haliaetus*	Águia-pesqueira	X	III	II		A-I	CR/EN
Accipitridae	*Elanus caeruleus*	Peneireiro-cinzento	X	III	II		A-I	NT
Accipitridae	*Pernis apivorus*	Bútio-vespeiro	X	III	II		A-I	VU
Accipitridae	*Circaetus gallicus*	Águia-cobreira	X	III	II		A-I	NT
Accipitridae	*Aquila fasciata*	Águia de Bonelli	X	III	II		A-I*	EN
Accipitridae	*Hieraaetus pennatus*	Águia-calçada	X	III	II		A-I	NT
Accipitridae	*Circus aeruginosus*	Águia-sapeira	X	III	II		A-I	VU
Accipitridae	*Circus pygargus*	Tartaranhão-caçador	X	III	II		A-I	EN
Accipitridae	*Accipiter nisus*	Gavião	X	III	II			LC
Accipitridae	*Milvus migrans*	Milhafre-preto	X	III	II		A-I	LC
Accipitridae	*Buteo buteo*	Águia-d'asa-redonda	C	III	II			LC
Upupidae	*Upupa epops*	Poupa	C	II				LC
Meropidae	*Merops apiaster*	Abelharuco	X	II	II			LC
Alcedinidae	*Alcedo atthis*	Guarda-rios	C	II			A-I	LC
Picidae	*Jynx torquilla*	Torcicolo	X	II				DD
Picidae	*Picus sharpei*	Peto-real	X	II				LC
Picidae	*Dryobates minor*	Pica-pau-galego	X	II				LC
Picidae	*Dendrocopos major*	Pica-pau-malhado	C	II				LC
Falconidae	*Falco tinnunculus*	Peneireiro	X	II	II	II		LC
Falconidae	*Falco subbuteo*	Ógea	X	II	II	II		VU
Falconidae	*Falco peregrinus*	Falcão-peregrino	X	III	II	I/II	A-I	VU
Oriolidae	*Oriolus oriolus*	Papa-figos	X	III	II			LC

Família	Nome científico	Nome vulgar	Ocorrência	Convenções/ Decreto-Lei				Estatuto de Conservação
				Berna	Bona	CITES	D.L. 140/99	
Laniidae	*Lanius meridionalis*	Picanço-real	X	II				LC
Laniidae	*Lanius senator*	Picanço-barreteiro	X	II				NT
Corvidae	*Cyanopica cooki*	Charneco	C	III				LC
Corvidae	*Garrulus glandarius*	Gaio	X					LC
Corvidae	*Pica pica*	Pega-rabilonga	X					LC
Corvidae	*Corvus corax*	Corvo	X	III				NT
Corvidae	*Corvus corone*	Gralha-preta	C					LC
Paridae	*Periparus ater*	Chapim-carvoeiro	X	II				LC
Paridae	*Lophophanes cristatus*	Chapim-de-poupa	C	II				LC
Paridae	*Cyanistes caeruleus*	Chapim-azul	X	II				LC
Paridae	*Parus major*	Chapim-real	C	II				LC
Remizidae	*Remiz pendulinus*	Chapim-de-mascarilha	X	III				NT
Alaudidae	*Calandrella brachydactyla*	Calhandrinha-galucha	X	II			A-I	LC
Alaudidae	*Lullula arborea*	Cotovia-dos-bosques	X	III			A-I	LC
Alaudidae	*Galerida theklae*	Cotovia-escura	X	II			A-I	LC
Alaudidae	*Galerida cristata*	Cotovia-de-poupa	X	III				LC
Cisticolidae	*Cisticola juncidis*	Fuinha-dos-juncos	C	III	II			LC
Acrocephalidae	*Hippolais polyglotta*	Felosa-poliglota	X	III	II			LC
Acrocephalidae	*Acrocephalus scirpaceus*	Rouxinol-dos-caniços	X	III	II			NT
Acrocephalidae	*Acrocephalus arundinaceus*	Rouxinol-grande-dos-caniços	X	III	II			LC
Locustellidae	*Locustella luscinioides*	Cigarrinha-ruiva	X	III	II			VU
Hirundinidae	*Delichon urbicum*	Andorinha-dos-beirais	X	II				LC
Hirundinidae	*Cecropis daurica*	Andorinha-dáurica	X	II				LC
Hirundinidae	*Hirundo rustica*	Andorinha-das-chaminés	X	II				LC
Hirundinidae	*Riparia riparia*	Andorinha-das-barreiras	X	II				LC
Phylloscopidae	*Phylloscopus bonelli*	Felosa-de-papo-branco	X	III	II			LC
Phylloscopidae	*Phylloscopus ibericus*	Felosinha-ibérica	X	III	II			LC
Phylloscopidae	*Phylloscopus collybita*	Felosinha	X	III	II			LC
Scotocercidae	*Cettia cetti*	Rouxinol-bravo	X	III	II			LC
Aegithalidae	*Aegithalos caudatus*	Chapim-rabilongo	X	III	II			LC
Sylviidae	*Sylvia atricapilla*	Toutinegra-de-barrete	C	II	II			LC
Sylviidae	*Sylvia melanocephala*	Toutinegra-dos-valados	X	II	II			LC
Sylviidae	*Sylvia undata*	Toutinegra-do-mato	X	II	II		A-I	LC
Certhiidae	*Certhia brachydactyla*	Trepadeira	X	II				LC
Sittidae	*Sitta europaea*	Trepadeira-azul	X	II				LC
Troglodytidae	*Troglodytes troglodytes*	Carriça	C	II				LC
Sturnidae	*Sturnus unicolor*	Estorninho-preto	C	III				LC
Turdidae	*Turdus viscivorus*	Tordoveia	X	III	II			LC
Turdidae	*Turdus merula*	Melro	C	III	II			LC
Muscicapidae	*Muscicapa striata*	Taralhão-cinzento	X	II	II			NT
Muscicapidae	*Erithacus rubecula*	Pisco-de-peito-ruivo	C	II	II			LC

Família	Nome científico	Nome vulgar	Ocorrência	Convenções/ Decreto-Lei				Estatuto de Conservação
				Berna	Bona	CITES	D.L. 140/99	
Muscicapidae	*Luscinia megarhynchos*	Rouxinol-comum	X	II	II			LC
Muscicapidae	*Phoenicurus ochruros*	Rabirruivo-comum	C	II	II			LC
Muscicapidae	*Phoenicurus phoenicurus*	Rabirruivo-de-testa-branca	X	II	II			LC
Muscicapidae	*Saxicola torquatus*	Cartaxo-comum	X	II	II			LC
Regulidae	*Regulus ignicapilla*	Estrelinha-real	X	II	II			LC
Estrildidae	*Estrilda astrild*	Bico-de-lacre	C	III				
Passeridae	*Passer domesticus*	Pardal	C					LC
Passeridae	*Passer hispaniolensis*	Pardal-espanhol	X	III				LC
Passeridae	*Passer montanus*	Pardal-montês	X	III				LC
Passeridae	*Petronia petronia*	Pardal-francês	X	III				LC
Motacillidae	*Motacilla flava*	Alvéola-amarela	C	II	II			LC
Motacillidae	*Motacilla cinerea*	Alvéola-cinzenta	X	II	II			LC
Motacillidae	*Motacilla alba*	Alvéola-branca	C	II	II			LC
Fringillidae	*Fringilla coelebs*	Tentilhão	X	III				LC
Fringillidae	*Coccothraustes coccothraustes*	Bico-grossudo	X	III				LC
Fringillidae	*Chloris chloris*	Verdilhão	X	II				LC
Fringillidae	*Linaria cannabina*	Pintarroxo	X	II				LC
Fringillidae	*Carduelis carduelis*	Pintassilgo	C	II				LC
Fringillidae	*Serinus serinus*	Milheira	X	III				LC
Fringillidae	*Spinus spinus*	Lugre	X	III				LC
Emberizidae	*Emberiza calandra*	Trigueirão	C	III				LC
Emberizidae	*Emberiza cirlus*	Escrevedeira-de-garganta-amarela	X	II				LC

Quadro 4 - Lista das espécies de mamíferos elencados para a área de estudo (Ocorrência: X – potencial; C – confirmada. Estatuto de conservação em Portugal, de acordo com o Livro Vermelho [Cabral et al., 2006]: LC – Pouco preocupante; DD – Informação insuficiente; VU – Vulnerável).

Família	Nome científico	Nome comum	Ocorrênci	Endemismo	Convenções/ Decreto-Lei				Estatuto de Conser-vação
					Berna	Bona	CITES	D.L. 140/99	
Cervidae	*Cervus elaphus*	Veado	X		III				LC
Suidae	*Sus scrofa*	Javali	C						LC
Canidae	*Vulpes vulpes*	Raposa	X				D		LC
Felidae	*Felis silvestris*	Gato-bravo	X		II		A - II	B-IV	VU
Herpestidae	*Herpestes ichneumon*	Sacarrabos	X		III			B-V / D	LC
Mustelidae	*Lutra lutra*	Lontra	X		II		A - I	B-II / B-IV	LC
Mustelidae	*Martes foina*	Fuinha	X		III				LC
Mustelidae	*Meles meles*	Texugo	X		III				LC
Mustelidae	*Mustela putorius*	Toirão	X		III			B-V	DD
Viverridae	*Genetta genetta*	Geneta	X		III			B-V	LC
Molossidae	*Tadarida teniotis*	Morcego-rabudo	X		II	II		B-IV	DD
Vespertilionidae	*Eptesicus serotinus*	Morcego-hortelão-escuro	X		II	II		B-IV	LC
Vespertilionidae	*Nyctalus lasiopterus*	Morcego-arborícola-gigante	X		II	II		B-IV	DD
Vespertilionidae	*Nyctalus leisleri*	Morcego-arborícola-pequeno	X		II	II		B-IV	DD
Vespertilionidae	*Pipistrellus kuhlii*	Morcego de Kuhl	X		II	II		B-IV	LC
Vespertilionidae	*Pipistrellus pipistrellus*	Morcego-anão	X		II	II		B-IV	LC
Vespertilionidae	*Pipistrellus pygmaeus*	Morcego-pigmeu	X		II	II		B-IV	LC
Erinaceidae	*Erinaceus europaeus*	Ouriço-cacheiro	X		III				LC
Leporidae	*Lepus granatensis*	Lebre	C	Ibérico	III				LC
Leporidae	*Oryctolagus cuniculus*	Coelho-bravo	X						NT
Cricetidae	*Microtus cabrerae*	Rato de Cabrera	X	Ibérico	II			B-II / B-IV	VU

Anexo 1.12 – Impactes Cumulativo – Geocatalogo

Habitats	Área_ZEC		Projetos Agroflorestais			Projetos Turísticos		Projetos Florestais	Área de Afetação		Área em Manutenção	
	Área (ha)	%	Area agrícola	Área florestal	Área impermeável	Área florestal	Área turística	Área florestal	Área (ha)	%	Área (ha)	%
1240	10,47	0,03	0	0	0	0,84	0	10,22	0	0,00	11,06	0,03
2110	11,33	0,04	0	3,54	0	0,17	0	7,41	0	0,00	11,12	0,03
2260	3747,24	11,66	192,32	1107,78	7,83	1131,71	3,35	1267,36	203,5	0,63	3506,85	10,91
2330	156,16	0,49	56,4	65,65	0	0	0	22,42	56,4	0,18	88,07	0,27
3110	23,64	0,07	0	0	0	0	0	23,6	0	0,00	23,60	0,07
6310	264,12	0,82	0	0,01	0	0	0	264,12	0	0,00	264,13	0,82
6420	45,30	0,14	5,26	1,74	0	0	0	42,04	5,26	0,02	43,78	0,14
9330	2,07	0,01	0	0	0	0	0	0,34	0	0,00	0,34	0,00
1150pt1/pt2+1140pt1+92D0pt2	306,34	0,95	0	0	0	0	0	129,65	0	0,00	129,65	0,40
1150pt1+1140pt1	13,74	0,04	0	0	0	0	0	11,78	0	0,00	11,78	0,04
1150pt1+1140pt1+6420	9,50	0,03	0	0	0	0	0	9,25	0	0,00	9,25	0,03
1150pt1+1140pt1+92D0pt2	57,16	0,18	0	0	0	0	0	56,64	0	0,00	56,64	0,18
1150pt1+1410	11,67	0,04	0	0	0	0	0	11,67	0	0,00	11,67	0,04
1150pt1+2110	5,03	0,02	0	0	0	0	0	5,03	0	0,00	5,03	0,02
1150pt1+6410pt2	9,12	0,03	0	0	0	0	0	9,12	0	0,00	9,12	0,03
1150pt2+1140pt1	10,64	0,03	0	0	0	0	0	9,93	0	0,00	9,93	0,03
1240+2110	4,96	0,02	0	0	0	0	0	4,96	0	0,00	4,96	0,02
1240+2110+2260	4,31	0,01	0	0	0	0	0	4,31	0	0,00	4,31	0,01
2110+2120	2,16	0,01	0	0	0	0	0	2,12	0	0,00	2,12	0,01
2110+2120+2130pt1	25,95	0,08	0	0	0	0	0	25,95	0	0,00	25,95	0,08
2110+2130pt1	10,58	0,03	0	1,45	0	0	0	9,03	0	0,00	10,48	0,03
2110+2130pt1+2120	1,98	0,01	0	0	0	0	0	1,98	0	0,00	1,98	0,01
2110+2130pt1+2230pt2	2,49	0,01	0	0	0	0	0	2,49	0	0,00	2,49	0,01
2130pt1	0,89	0,00	0	0	0	0	0	0,89	0	0,00	0,89	0,00
2130pt1+2110+2120	32,81	0,10	0	4,71	0	0	0	28	0	0,00	32,71	0,10
2130pt1+2120	2,06	0,01	0	0	0	0	0	2,06	0	0,00	2,06	0,01

Habitats	Área_ZEC		Projetos Agroflorestais			Projetos Turísticos		Projetos Florestais	Área de Afetação		Área em Manutenção	
	Área (ha)	%	Area agrícola	Área florestal	Área impermeável	Área florestal	Área turística	Área florestal	Área (ha)	%	Área (ha)	%
2130pt1+2150pt1	11,69	0,04	0	0	0	0	0	11,69	0	0,00	11,69	0,04
2130pt1+2150pt1+2330	56,09	0,17	0	0	0	0	0	56,09	0	0,00	56,09	0,17
2130pt1+2230pt1	16,79	0,05	0	0	0	0	0	16,79	0	0,00	16,79	0,05
2130pt1+2230pt1+2120	3,35	0,01	0	3,35	0	0	0	0	0	0,00	3,35	0,01
2130pt1+2230pt1+2250	6,49	0,02	0	0	0	0	0	6,49	0	0,00	6,49	0,02
2130pt1+2230pt1+2330	136,91	0,43	0,1	129,72	0	0	0	8,79	0,1	0,00	138,51	0,43
2130pt1+2230pt2+2330	8,93	0,03	0	8,93	0	0	0	0	0	0,00	8,93	0,03
2130pt1+2250+2330	7,71	0,02	0	0	0	0	0	7,71	0	0,00	7,71	0,02
2130pt1+2250pt1+2260	17,29	0,05	0,03	15,2	0	0	0	2,14	0,03	0,00	17,34	0,05
2130pt1+2250pt1+2330	89,45	0,28	0	0	0	0	0	89,35	0	0,00	89,35	0,28
2130pt1+2260	1,54	0,00	0	0	0	0	0	1,54	0	0,00	1,54	0,00
2130pt1+2260+2250pt1	232,15	0,72	0,07	232,07	0	0	0	20,96	0,07	0,00	253,03	0,79
2130pt1+2260+2330	2,09	0,01	0,1	1,99	0	0	0	0,76	0,1	0,00	2,75	0,01
2130pt1+2270	12,64	0,04	0,27	12,38	0	0	0	9,61	0,27	0,00	21,99	0,07
2130pt1+2330	21,31	0,07	0	0	0	1,31	0	21,3	0	0,00	22,61	0,07
2130pt1+2330+2230pt1	9,97	0,03	0,06	9,91	0	0	0	0,01	0,06	0,00	9,92	0,03
2150pt1	69,77	0,22	6,17	0	0	0	0	48,13	6,17	0,02	48,13	0,15
2150pt1+2230pt2+2260	128,12	0,40	0	117,59	0	0	0	10,36	0	0,00	127,95	0,40
2150pt1+2230pt2+2260+6220pt4	85,90	0,27	0	9,29	0	0	0	0	0	0,00	9,29	0,03
2150pt1+2250pt1+2330	5,60	0,02	0	0	0	0	0	5,6	0	0,00	5,60	0,02
2150pt1+2250pt2+2260	107,18	0,33	0	0	0	0	0	106,36	0	0,00	106,36	0,33
2150pt1+2250pt2+2260+2330	1949,19	6,06	21,12	1927,36	0	0,32	0	0	21,12	0,07	1927,68	6,00
2150pt1+2250pt2+2330	85,33	0,27	0,19	80,61	0	0	0	4,53	0,19	0,00	85,14	0,26
2150pt1+2260	690,78	2,15	0,39	96,59	0	113,57	0,02	502,09	0,41	0,00	712,25	2,22
2150pt1+2260+2230pt2	4,52	0,01	0	3,93	0	0	0	0	0	0,00	3,93	0,01
2150pt1+2260+2250pt1/pt2	875,66	2,72	0	0	0	0	0	875,36	0	0,00	875,36	2,72
2150pt1+2260+2250pt2	593,42	1,85	0	0,12	0	85,4	1,07	556,73	1,07	0,00	642,25	2,00

Habitats	Área_ZEC		Projetos Agroflorestais			Projetos Turísticos		Projetos Florestais	Área de Afetação		Área em Manutenção	
	Área (ha)	%	Area agrícola	Área florestal	Área impermeável	Área florestal	Área turística	Área florestal	Área (ha)	%	Área (ha)	%
2150pt1+2260+2270	23,54	0,07	0	0,25	0	0	0	23,54	0	0,00	23,79	0,07
2150pt1+2260+2330	718,73	2,24	4,64	507,15	0	0,34	0	230,31	4,64	0,01	737,80	2,30
2150pt1+2260+3110	35,27	0,11	0	0	0	0	0	35,27	0	0,00	35,27	0,11
2150pt1+2260+5330pt4	9,53	0,03	0	9,53	0	0	0	0	0	0,00	9,53	0,03
2150pt1+2260+6220pt4	10,80	0,03	0	10,8	0	0	0	0	0	0,00	10,80	0,03
2150pt1+2260+9330	16,28	0,05	0	0	0	0	0	16,22	0	0,00	16,22	0,05
2150pt1+2330+2260	546,77	1,70	127,33	385,76	8,3	0	0	0	135,6	0,42	385,76	1,20
2150pt1+5330pt4/6	4,28	0,01	0	3,93	0	0	0	0	0	0,00	3,93	0,01
2150pt1+5330pt6	4,65	0,01	0	0	0	0	0	4,65	0	0,00	4,65	0,01
2150pt1+6220pt4	4,93	0,02	0	2,41	0	0	0	2,52	0	0,00	4,93	0,02
2190pt1+4020pt2+6410pt2	29,23	0,09	0	29,08	0	0	0	0	0	0,00	29,08	0,09
2190pt1+6410pt1+4020pt2	2,13	0,01	0	2,13	0,14	0	0	0	0,14	0,00	2,13	0,01
2190pt1+6420	5,56	0,02	0	0	0	0	0	5,56	0	0,00	5,56	0,02
2190pt1+91E0pt3+6410pt1	35,41	0,11	0	35,38	0	0	0	0	0	0,00	35,38	0,11
2190pt2	1,35	0,00	0	0	0	0	0	1,35	0	0,00	1,35	0,00
2190pt2+3110	1,18	0,00	0	0	0	0	0	1,18	0	0,00	1,18	0,00
2190pt2+3120	3,62	0,01	0	3,62	0	0	0	0	0	0,00	3,62	0,01
2190pt2+4020pt2+6410pt1	5,92	0,02	0	5,92	0	0	0	0	0	0,00	5,92	0,02
2190pt2+4020pt2+6420	8,34	0,03	0	0	0	0	0	8,34	0	0,00	8,34	0,03
2190pt2+6410pt1+4020pt2	9,59	0,03	1,03	8,42	0	0	0	0	1,03	0,00	8,42	0,03
2190pt2+6410pt1+91E0pt3	2,96	0,01	0	2,96	0	0	0	0	0	0,00	2,96	0,01
2190pt2+6410pt2	1,63	0,01	0	0	0	0	0	1,63	0	0,00	1,63	0,01
2190pt2+6420	4,02	0,01	0	0	0	0	0	4,02	0	0,00	4,02	0,01
2190pt2+6420+91E0pt3	11,95	0,04	1,97	6,18	0	0	0	11,86	1,97	0,01	18,04	0,06
2190pt2+91E0pt3+6410pt1+6430pt2	12,80	0,04	0	3,12	0	5	0,03	4,65	0,03	0,00	12,77	0,04
2230pt1+2250pt1+2260	232,05	0,72	0	232,05	0	0	0	0	0	0,00	232,05	0,72
2230pt2	50,03	0,16	0	21,49	0	0	0	28,03	0	0,00	49,52	0,15

Habitats	Área_ZEC		Projetos Agroflorestais			Projetos Turísticos		Projetos Florestais	Área de Afetação		Área em Manutenção	
	Área (ha)	%	Area agrícola	Área florestal	Área impermeável	Área florestal	Área turística	Área florestal	Área (ha)	%	Área (ha)	%
2230pt2+2260	762,49	2,37	131,54	234,55	4,77	0,51	0	378,61	136,3	0,42	613,67	1,91
2230pt2+2260+2330	136,85	0,43	0	26,82	0	0	0	110,02	0	0,00	136,84	0,43
2230pt2+2330	5,52	0,02	0	5,52	0	0	0	0	0	0,00	5,52	0,02
2250+2260	31,09	0,10	0	0	0	7,5	0	31,09	0	0,00	38,59	0,12
2250+2260+2120	11,93	0,04	0	0	0	0	0	11,8	0	0,00	11,80	0,04
2250+2260+2330	32,81	0,10	0	0	0	11,23	0	32,81	0	0,00	44,04	0,14
2250+2330	4,84	0,02	0	0	0	0	0	4,84	0	0,00	4,84	0,02
2250pt1+2130pt1+2260	1,94	0,01	0	0	0	0	0	1,94	0	0,00	1,94	0,01
2250pt1+2130pt1+2330	3,93	0,01	0	0	0	0	0	3,93	0	0,00	3,93	0,01
2250pt1+2260	7,68	0,02	0	0	0	6,55	0	7,68	0	0,00	14,23	0,04
2250pt1+2260+2150pt1	29,37	0,09	0	0	0	0	0	29,37	0	0,00	29,37	0,09
2250pt2	0,80	0,00	0	0,8	0	0	0	0	0	0,00	0,80	0,00
2250pt2+2150pt1+2260	7,80	0,02	0	0	0	0	0	7,8	0	0,00	7,80	0,02
2250pt2+2230pt1+2330	8,25	0,03	0	0	0	0	0	8,25	0	0,00	8,25	0,03
2250pt2+2260	44,76	0,14	0	0,84	0	0	0	44,56	0	0,00	45,40	0,14
2250pt2+2260+2330	157,24	0,49	0	26,19	0	0	0	124,21	0	0,00	150,40	0,47
2260+2130pt1	15,18	0,05	0	1,01	0	0	0	14,17	0	0,00	15,18	0,05
2260+2130pt1+2250pt1	38,72	0,12	0	0	0	3,7	0	38,72	0	0,00	42,42	0,13
2260+2130pt1+2250pt2	33,36	0,10	0	0	0	0	0	33,36	0	0,00	33,36	0,10
2260+2150pt1	764,76	2,38	0	89,07	0	124,69	0,83	657,79	0,83	0,00	871,55	2,71
2260+2150pt1+2230pt2	275,18	0,86	0	1,02	0	267,38	0,3	6,16	0,3	0,00	274,56	0,85
2260+2150pt1+2250pt1	74,28	0,23	0	0	0	0	0	74,28	0	0,00	74,28	0,23
2260+2150pt1+2250pt2	625,09	1,94	63,99	340,61	0	0,83	0	193,66	63,99	0,20	535,10	1,66
2260+2150pt1+2330	688,65	2,14	215,64	198,45	4,23	51,64	0	194,01	219,9	0,68	444,10	1,38
2260+2230pt1+2250pt1	362,60	1,13	0	302,94	0	0	59,65	0	59,65	0,19	302,94	0,94
2260+2230pt2	810,59	2,52	0,26	379,4	0	0	0	369,84	0,26	0,00	749,24	2,33
2260+2230pt2+2330	1054,49	3,28	122,29	263,9	5,76	0	0	662,42	128,1	0,40	926,32	2,88

Habitats	Área_ZEC		Projetos Agroflorestais			Projetos Turísticos		Projetos Florestais	Área de Afetação		Área em Manutenção	
	Área (ha)	%	Area agrícola	Área florestal	Área impermeável	Área florestal	Área turística	Área florestal	Área (ha)	%	Área (ha)	%
2260+2250	35,61	0,11	0,1	26,11	0,19	0	0	8,9	0,29	0,00	35,01	0,11
2260+2250+2270	6,85	0,02	0	0	0	4,62	0	6,85	0	0,00	11,47	0,04
2260+2250+2330	8,31	0,03	0	0	0	0	0	8,31	0	0,00	8,31	0,03
2260+2250pt1	79,96	0,25	0	0	0	6,8	0	79,63	0	0,00	86,43	0,27
2260+2250pt1/pt2	45,77	0,14	0	0	0	0	0	45,77	0	0,00	45,77	0,14
2260+2250pt1+2120	2,35	0,01	0	0	0	0,65	0	2,35	0	0,00	3,00	0,01
2260+2250pt1+2330	28,50	0,09	0	0	0	0	0	28,5	0	0,00	28,50	0,09
2260+2250pt2	8,71	0,03	0	0	0	1,35	0	8,7	0	0,00	10,05	0,03
2260+2250pt2+2330	42,29	0,13	0	2,29	0	0	0	41	0	0,00	43,29	0,13
2260+2270	17,45	0,05	0	0	0	0,73	0	17,45	0	0,00	18,18	0,06
2260+2270+2150pt1	25,20	0,08	0	0,2	0	0,11	0	25,2	0	0,00	25,51	0,08
2260+2270+2250	29,75	0,09	0	0	0	29,75	0	29,75	0	0,00	59,50	0,19
2260+2330	2303,77	7,17	243,79	1291,74	6,66	18,81	0,69	719,68	251,1	0,78	2030,23	6,32
2260+2330+2150pt1	4,69	0,01	0	0	0	0	0	4,69	0	0,00	4,69	0,01
2260+2330+2250	9,80	0,03	0	0	0	0	0	9,8	0	0,00	9,80	0,03
2260+2330+2250pt2	1059,71	3,30	141,03	886,99	10,97	4,62	0	15,52	152	0,47	907,13	2,82
2260+2330+3110	15,71	0,05	0	0	0	0	0	15,71	0	0,00	15,71	0,05
2260+6410pt1	14,80	0,05	0,13	0,1	0	0	0	14,52	0,13	0,00	14,62	0,05
2270+2130pt1+2260	18,80	0,06	0,12	18,68	0	0	0	2,17	0,12	0,00	20,85	0,06
2270+2150pt1	3,93	0,01	0	0	0	0	0	3,78	0	0,00	3,78	0,01
2270+2250+2260	8,47	0,03	0	0	0	0,13	0	8,47	0	0,00	8,60	0,03
2270+2260+2250pt1	11,50	0,04	0	0	0	3,31	0	11,5	0	0,00	14,81	0,05
2290pt1+4020pt2+6410pt1	1,20	0,00	0	1,2	0	0	0	0	0	0,00	1,20	0,00
2330+2150pt1+2260	54,60	0,17	0	54,49	0	0	0	1,83	0	0,00	56,32	0,18
2330+2260	30,36	0,09	0	19,79	0	0	0	16,83	0	0,00	36,62	0,11
2330+2260+2230pt2	63,30	0,20	0	0	0	63,3	0	0	0	0,00	63,30	0,20
3110+3150+91E0pt3	3,82	0,01	0	0	0	0	0	3,82	0	0,00	3,82	0,01

Habitats	Área_ZEC		Projetos Agroflorestais			Projetos Turísticos		Projetos Florestais	Área de Afetação		Área em Manutenção	
	Área (ha)	%	Area agrícola	Área florestal	Área impermeável	Área florestal	Área turística	Área florestal	Área (ha)	%	Área (ha)	%
3110+3160+6410pt2	1,46	0,00	0	0	0	0	0	1,46	0	0,00	1,46	0,00
3110+4020pt2+6410pt2	2,36	0,01	0	0	0	0	0	2,36	0	0,00	2,36	0,01
3110+4020pt2+7140pt3	9,74	0,03	0	0	0	0	0	9,74	0	0,00	9,74	0,03
3110+4020pt2+7410pt3	1,28	0,00	0	0,08	0	0	0	0	0	0,00	0,08	0,00
3110+4020pt2+91E0pt3	19,69	0,06	0	0	0	0	0	19,69	0	0,00	19,69	0,06
3110+6410pt1/2/3+7140pt3	12,06	0,04	0	0	0	0	0	12,06	0	0,00	12,06	0,04
3110+6410pt1+7140pt3	2,53	0,01	0	0	0	0	0	2,53	0	0,00	2,53	0,01
3110+6420	1,47	0,00	0	0	0	0	0	1,47	0	0,00	1,47	0,00
3110+7140pt3	3,25	0,01	0	3,25	0	0	0	0	0	0,00	3,25	0,01
3110+91E0pt3	28,19	0,09	0	0	0	2,66	0	0,03	0	0,00	2,69	0,01
3130pt4+6410pt2/3	1,04	0,00	0	1,04	0	0	0	0	0	0,00	1,04	0,00
3130pt4+6420	0,59	0,00	0	0	0	0	0	0,59	0	0,00	0,59	0,00
3150+2230+6420	46,10	0,14	0	45,21	0	0,29	0	0	0	0,00	45,50	0,14
3150+3110+3160	4,19	0,01	0	0	0	0	0	4,19	0	0,00	4,19	0,01
3150+3110+6410pt1	17,02	0,05	0	16,83	0	0,01	0	0	0	0,00	16,84	0,05
3150+3110+7140pt3	1,54	0,00	0	0	0	0	0	1,54	0	0,00	1,54	0,00
3150+4020pt2+6410pt1/2/3	3,44	0,01	0	3,44	0	0	0	0	0	0,00	3,44	0,01
3160+3110+7140pt3	1,67	0,01	0	1,67	0	0	0	0	0	0,00	1,67	0,01
4020pt1+91E0pt3+6410pt1	4,75	0,01	0	1,03	0	0	0	3,71	0	0,00	4,74	0,01
4020pt2	3,23	0,01	0	3,23	0	0	0	0	0	0,00	3,23	0,01
4020pt2+3110	37,64	0,12	0	6,33	0	0	0	31,31	0	0,00	37,64	0,12
4020pt2+6410pt1	15,44	0,05	0	15,44	0	0	0	0	0	0,00	15,44	0,05
4020pt2+6410pt1+6420	5,68	0,02	0	0,45	0	0,09	0	0	0	0,00	0,54	0,00
4020pt2+6410pt1+7140pt3	3,13	0,01	0	1,35	0	0	0	1,93	0	0,00	3,28	0,01
4020pt2+6410pt1+91E0pt3	50,61	0,16	0	37,13	0	0	0	10,36	0	0,00	47,49	0,15
4020pt2+6410pt1+92A0pt3	6,77	0,02	0	0	0	0	0	6,77	0	0,00	6,77	0,02
4020pt2+7140pt3+91E0pt3	5,37	0,02	0	5,37	0	0	0	0	0	0,00	5,37	0,02

Habitats	Área_ZEC		Projetos Agroflorestais			Projetos Turísticos		Projetos Florestais	Área de Afetação		Área em Manutenção	
	Área (ha)	%	Area agrícola	Área florestal	Área impermeável	Área florestal	Área turística	Área florestal	Área (ha)	%	Área (ha)	%
5330pt3+91E0pt3+9330	1,84	0,01	0	1,84	0	0	0	0	0	0,00	1,84	0,01
5330pt6+91E0pt3+9330	8,25	0,03	0	8,21	0	0,04	0	0	0	0,00	8,25	0,03
6220pt4	32,40	0,10	0	0,05	0	0	0	0	0	0,00	0,05	0,00
6310+2150pt1	74,18	0,23	0	0	0	0	0	66,14	0	0,00	66,14	0,21
6310+2260	108,54	0,34	0	0	0	0	0	108,54	0	0,00	108,54	0,34
6410pt1+4020pt2+5330pt3	13,94	0,04	0,08	12,78	0	1,04	0	0	0,08	0,00	13,82	0,04
6410pt1+4020pt2+91E0pt3	4,78	0,01	0	4,78	0	0	0	0	0	0,00	4,78	0,01
6410pt1+6420+9330	13,73	0,04	0	0	0	0	0	10,27	0	0,00	10,27	0,03
6410pt1+91E0pt3	2,22	0,01	0	2,22	0	0	0	0	0	0,00	2,22	0,01
6410pt2	24,41	0,08	0	0	0	0	0	24,41	0	0,00	24,41	0,08
6410pt2+3110+7140pt3	2,93	0,01	0	0	0	0	0	2,93	0	0,00	2,93	0,01
6410pt2+91E0pt3	9,46	0,03	0	0	0	0	0	9,46	0	0,00	9,46	0,03
6420+6410pt2+92A0pt3	6,18	0,02	0	0	0	0	0	5,92	0	0,00	5,92	0,02
91E0pt3	26,19	0,08	0,06	14,96	0	0	0	25,62	0,06	0,00	40,58	0,13
91E0pt3+2150pt1+9330	14,13	0,04	0	0	0	0	0	14,13	0	0,00	14,13	0,04
91E0pt3+3110	1,10	0,00	0	0,88	0	0	0	0,21	0	0,00	1,09	0,00
91E0pt3+3110+6410pt2	30,10	0,09	0	0	0	0	0	30,1	0	0,00	30,10	0,09
91E0pt3+4020pt2+6410pt1	15,85	0,05	0	4,66	0	0	0	8,03	0	0,00	12,69	0,04
91E0pt3+4020pt2+7140pt3	6,29	0,02	0	6,28	0	0	0	0	0	0,00	6,28	0,02
91E0pt3+4020pt2+7140pt3+6410pt1	5,16	0,02	0	0	0	0	0	5,16	0	0,00	5,16	0,02
91E0pt3+6410pt1	8,51	0,03	0	3,12	0	0	0	5,4	0	0,00	8,52	0,03
92A0pt3	0,38	0,00	0	0	0	0	0	0,38	0	0,00	0,38	0,00
92A0pt3+6420+3110	8,97	0,03	0	0	0	0	0	8,97	0	0,00	8,97	0,03
92D0pt2	0,75	0,00	0	0	0	0	0	0,7	0	0,00	0,70	0,00
Sem habitat	9718,15	30,23	2559,39	1648,21	6,49	655,67	142,95	5071,33	2709	8,43	7375,21	22,94

Anexo 1.13 – Memória Descritiva e Justificativa dos Ventiladores

Ficha Técnica dos Ventiladores

MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

1. Enquadramento

A geada representa um dos principais riscos climáticos para a produção agrícola, especialmente em regiões onde as temperaturas podem cair abruptamente durante os meses de inverno. Estes fenómenos climáticos adversos têm o potencial de causar danos severos a culturas sensíveis, comprometendo a produtividade e, consequentemente, a sustentabilidade económica das explorações agrícolas.

Neste contexto, a utilização de ventiladores anti-geada surge como uma medida de mitigação eficaz e sustentável, oferecendo uma solução tecnológica de proteção contra geadas, amplamente testada e utilizada a nível internacional.

representam uma das soluções mais eficientes e amplamente adotadas na proteção de culturas agrícolas contra os efeitos adversos da geada. Desenvolvidos na Nova Zelândia pela New Zealand Frost Fans, estes ventiladores ganharam destaque no cenário agrícola global devido à sua eficácia, sustentabilidade e tecnologia avançada.

Os ventiladores FrostBoss® foram concebidos na Nova Zelândia, um país conhecido pela sua forte indústria agrícola e condições climáticas desafiadoras. A New Zealand Frost Fans, empresa responsável pelo seu desenvolvimento, combinou décadas de experiência no setor agrícola com inovação tecnológica para criar uma solução robusta e adaptável a diferentes culturas e regiões.

Desde então, os ventiladores FrostBoss® expandiram-se rapidamente para mercados internacionais, sendo atualmente utilizados em mais de 30 países, incluindo Estados Unidos, Canadá, Chile, Espanha, França, Itália, Portugal, Austrália e África do Sul. Esta presença global reflete a versatilidade e a confiança depositada pelos agricultores em diferentes condições climáticas e tipos de cultivo.

2. Caracterização

No âmbito do Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, localizado no concelho de Alcácer do Sal, na freguesia da Comporta e na União das freguesias de Alcácer do Sal (Santa Maria do Castelo e Santiago) e Santa Susana, associado à plantação de citrinos, equaciona-se o uso destes equipamentos.

A instalação de ventiladores anti-geada nos setores agrícolas mais sensíveis do Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo, i.e., que apresentam maior risco de formação de geada devido à sua topografia, visa, sobretudo:

- Proteger as culturas contra os danos provocados pela formação de geadas;
- Minimizar perdas económicas, assegurando a qualidade e a quantidade das colheitas;
- Promover a sustentabilidade agrícola, reduzindo o uso de recursos naturais e adotando práticas ambientais responsáveis.

Os registos históricos de temperatura da região de Alcácer do Sal revelam a ocorrência de formação de geada durante 10 a 12 dias por ano, nos meses de dezembro a fevereiro.

3. Justificação para a escolha dos ventiladores

A escolha dos ventiladores foi fundamentada em diversas vantagens técnicas, económicas e ambientais, nomeadamente:

3.1. Eficiência no controlo de geada

Os ventiladores funcionam através do princípio da inversão térmica, captando o ar quente das camadas superiores e redistribuindo-o ao nível das culturas. Esta técnica aumenta a temperatura próxima ao solo, evitando a formação de cristais de gelo nas plantas e minimizando o risco de danos.

Durante as noites frias, especialmente em zonas agrícolas, o ar frio e denso tende a acumular-se ao nível do solo, expondo as plantas ao risco de geadas. Ao girar suas grandes hélices, os ventiladores misturam o ar frio com o ar mais quente acima, elevando a temperatura ao nível das culturas e prevenindo os danos causados pelo congelamento.

3.2. Cobertura abrangente

Cada ventilador tem uma cobertura média de 7 hectares, o que permite proteger uma vasta área agrícola com um investimento reduzido em infraestruturas adicionais.

3.3. Baixo Impacto ambiental

Comparativamente a outras soluções, como sistemas de aspersão de água ou geradores de calor:

- Economia de água: Não requerem irrigação adicional, crucial em regiões com escassez hídrica;

- Baixa emissão de CO_2: Consomem menos energia e podem ser operados com fontes renováveis;
- Redução do uso de combustíveis fósseis: Alternativa mais sustentável face a sistemas baseados em queimadores a gás ou óleo;
- Baixo Nível de Ruído: Com tecnologia acústica avançada, os ventiladores operam de forma relativamente silenciosa, o que é ideal para explorações agrícolas próximas de áreas residenciais.

3.4. Tecnologia e Automação

Os ventiladores permitem a monitorização remota através de dispositivos móveis, oferecendo aos gestores agrícolas a possibilidade de ativar e controlar os equipamentos em tempo real, com base em previsões meteorológicas e condições ambientais.

4. Implementação e procedimentos

A instalação dos ventiladores seguirá os seguintes passos:

1. Infraestruturação: preparação do terreno e instalação das torres de suporte dos ventiladores.
2. Montagem dos Equipamentos: instalação das hélices e motores, com integração do sistema de monitoramento remoto.
3. Testes Operacionais: ensaios preliminares para garantir o correto funcionamento dos ventiladores.
4. Formação da Equipa: capacitação da equipa agrícola para operar e monitorar os ventiladores

5. Sustentabilidade e benefícios a longo prazo

A utilização dos ventiladores proporciona:

- Redução das Perdas de Produção: Garantindo colheitas mais consistentes e previsíveis.
- Aumento da Rentabilidade: Menores custos operacionais associados a perdas por geadas.
- Sustentabilidade Ambiental: Uso responsável de recursos naturais e contribuição para práticas agrícolas mais ecológicas.

Além disso, a adoção desta tecnologia reforça o compromisso da exploração agrícola com a inovação e a resiliência climática, criando uma vantagem competitiva no mercado.

6. Conclusão

A instalação dos ventiladores representa uma decisão estratégica e fundamentada, alinhando-se com as melhores práticas agrícolas e ambientais.

Esta medida garantirá a proteção eficaz das culturas contra geadas, assegurando a continuidade da produção e a sustentabilidade económica da exploração agrícola.

Combinando tecnologia, eficiência e respeito pelo ambiente, os ventiladores destacam-se como uma solução robusta e adaptável às necessidades do setor agrícola moderno.

NO.	DATE	DESCRIPTION
1	01/03/2019	ISSUE

Structural Drawings for Frost Fans C49

Drawing Index

S - Series

Sheet No.	Sheet Name	Issue Date	Rev. No.
S.01	C49 Tower Elevations	01/03/2019	1
S.02	C49 Foundation & Baseplate Details	01/03/2019	1



designphase ltd.
civil & structural engineers
PO Box 8196 - Havelock North - 4157 - PH - 06 877 5110

PH: 06 878 5130
114 QUEEN STREET EAST, HASTINGS

PROJECT TITLE
Frost Boss C49

PROJECT ADDRESS
1429 Omahu Road, Twyford

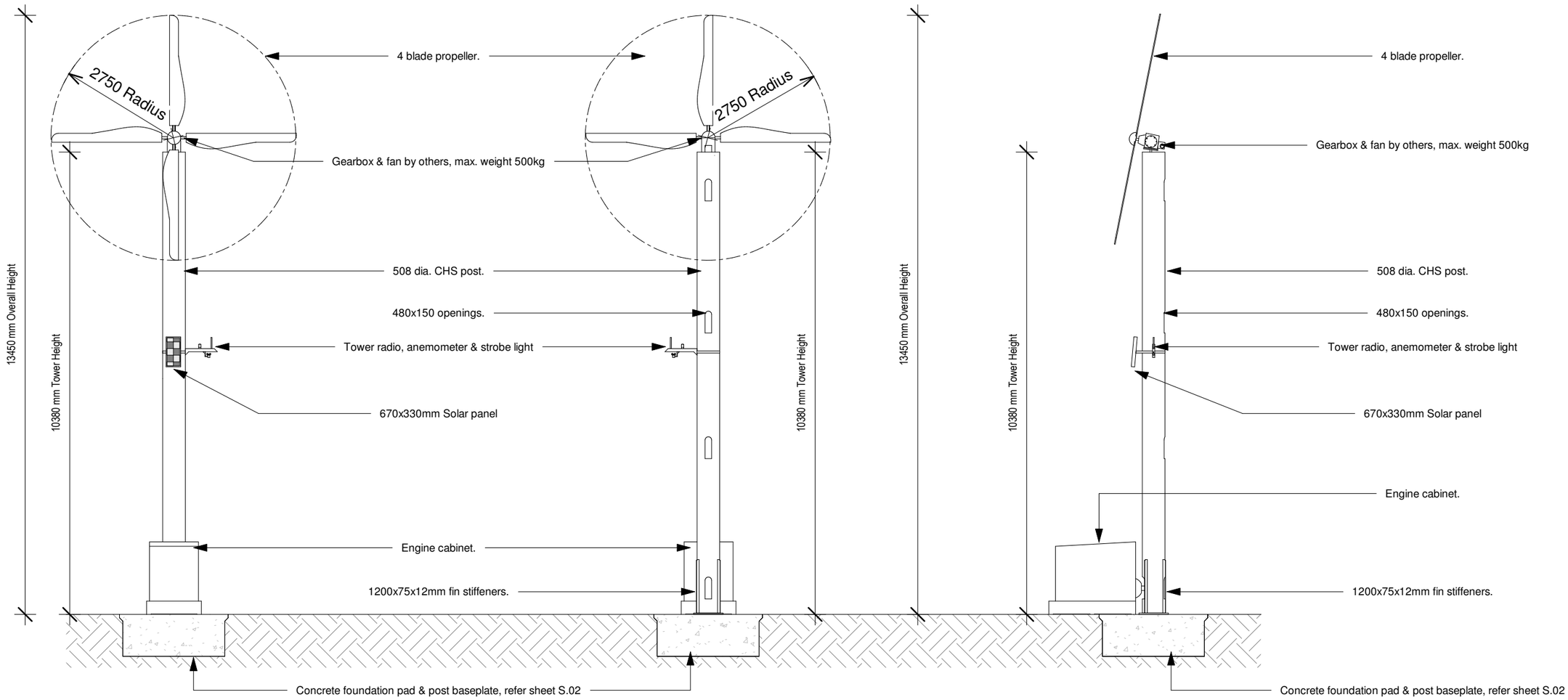
CLIENT NAME
Frsot Fans

SHEET NAME
Cover Page

DATE 01/03/2019
DRAWN BY KB

PROJECT NO.	SHEET NO.
1951	000

NO.	DATE	DESCRIPTION
1	01/03/2019	ISSUE



1 C49 Frost Fans

1 : 100 @ A3

designphase ltd.
civil & structural engineers
PO Box 8196 - Havelock North - 4157 - PH - 06 877 5130

PH: 06 878 5130
114 QUEEN STREET EAST, HASTINGS

PROJECT TITLE
Frost Boss C49

PROJECT ADDRESS
1429 Omahu Road, Twyford

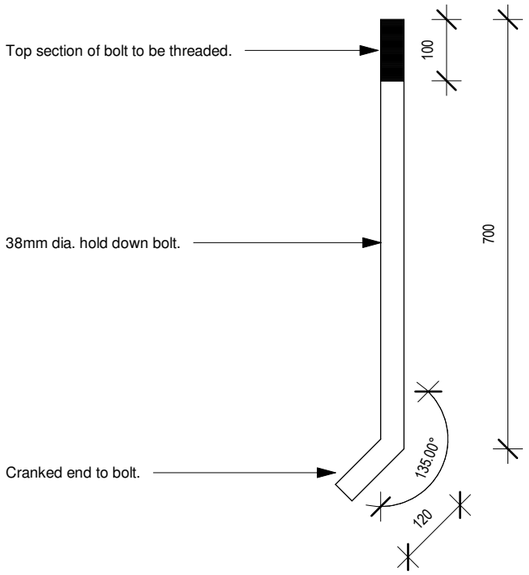
CLIENT NAME
Frsot Fans

SHEET NAME
C49 Tower Elevations

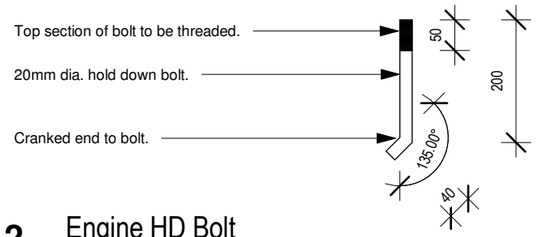
DATE	01/03/2019
DRAWN BY	KB

PROJECT NO.	SHEET NO.
1951	S.01

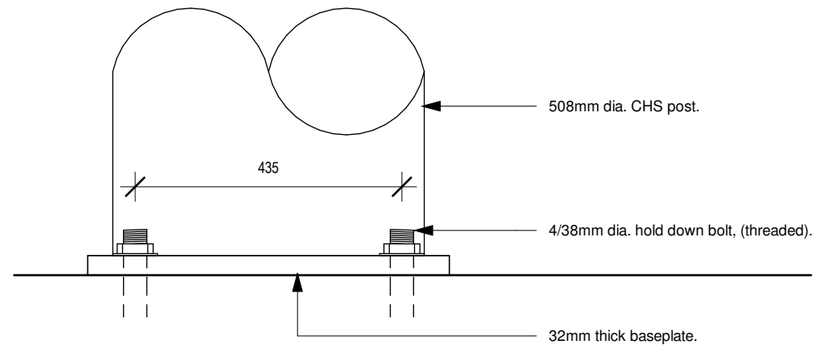
NO.	DATE	DESCRIPTION
1	01/03/2019	ISSUE



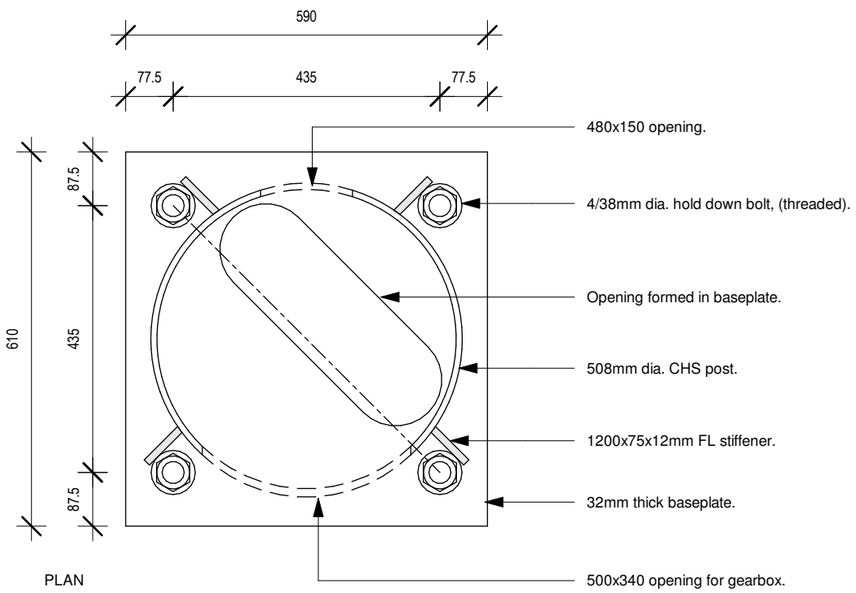
1 Tower HD Bolt
1 : 10 @ A3



2 Engine HD Bolt
1 : 10 @ A3

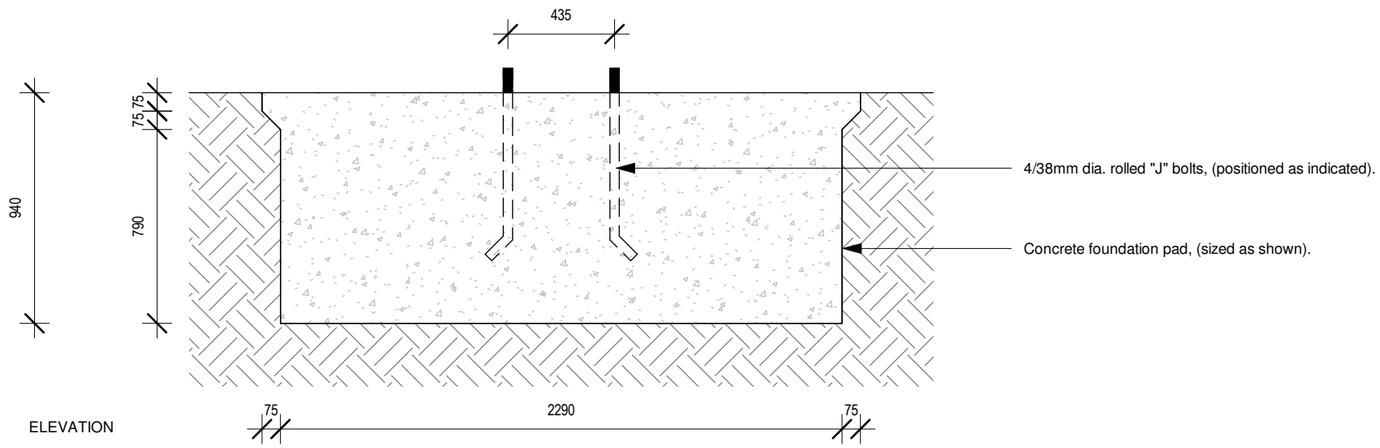


ELEVATION

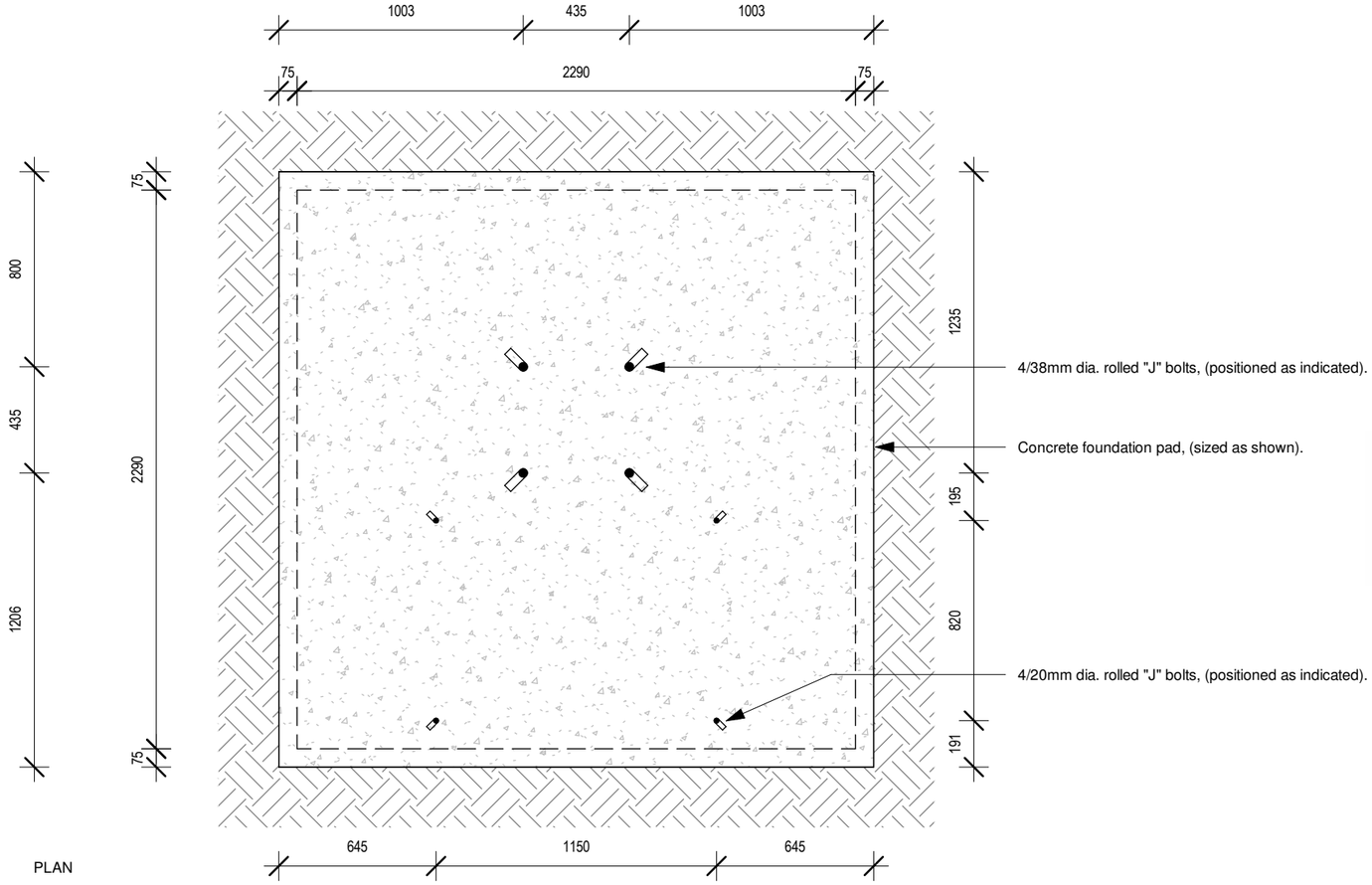


PLAN

3 Tower Baseplate
1 : 10 @ A3



ELEVATION



PLAN

4 Tower Foundation
1 : 25 @ A3

designphase ltd.
civil & structural engineers
PO BOX 8198 - HAVELOCK NORTH - HBLF - PH + 06 877 8110

PH: 06 878 5130
114 QUEEN STREET EAST, HASTINGS

PROJECT TITLE
Frost Boss C49

PROJECT ADDRESS
1429 Omahu Road, Twyford

CLIENT NAME
Frsot Fans

SHEET NAME
C49 Foundation & Baseplate Details

DATE 01/03/2019
DRAWN BY KB

PROJECT NO.	SHEET NO.
1951	S.02

Anexo 1.14 – Preparação do Solo – Pré-plantação - Férbio

FERBIO®

DÊ VIDA À SUA TERRA

CORRETIVO AGRÍCOLA ORGÂNICO

ORIGEM

O FERBIO é produzido através da digestão aeróbia (compostagem) controlada da fração orgânica de resíduos verdes, subprodutos de processamento mecânico de alimentos e lamas de ETAR.

CARACTERIZAÇÃO

Classe I

Conteúdo em metais pesados inferior ou igual aos valores máximos admissíveis para esta classificação

Doses de Aplicação

Não aplicar acima de 50 ton./ha/ano.

(Admite-se a aplicação do dobro, triplo, quádruplo ou quíntuplo destas quantidades desde que a periodicidade da sua aplicação seja, respetivamente, igual ou superior a 2, 3, 4 ou 5 anos.)

TEORES DECLARADOS

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Grau de maturação	-	V
Matéria orgânica	%	33,2
pH	-	8,3
Carbono total	%	19,2
C/N	-	14,3
Humidade	%	32,8
Condutividade	ms/cm	2,6
Azoto total (N)	%	1,71
Fósforo (P_2O_5)	%	1,66
Potássio (K_2O)	%	1,61
Magnésio (MgO)	%	0,96
Enxofre (S)	%	1,68
Cálcio (CaO)	%	23,9
Boro (B)	mg/kg	59,3
Crómio (Cr)	mg/kg	36,7
Cádmio (Cd)	mg/kg	0,55
Cobre (Cu)	mg/kg	66,20
Níquel (Ni)	mg/kg	15,4
Chumbo (Pb)	mg/kg	27,05
Zinco (Zn)	mg/kg	178
Mercúrio (Hg)	mg/kg	0,15
Massa volúmica aparente	g/L	958
Matérias inertes antropogénicos	%	<0,03
Granulometria <25mm (malha quadrada)	%	100
Pedras > 5mm	%	<0,79
Salmonella spp.	/25 g	Ausente
Escherichia coli	U.F.C / g	<10
Sementes e propágulos de infestantes	unid/L	0
Fitotoxicidade [Índice de germinação]	%	100
AOX (compostos organohalogenados adsorvíveis ou haletos orgânicos adsorvíveis)	mg/kg	69
LAS (alquilo benzenossulfonatos lineares)	mg/kg	60
DEPH [di(2 -etilhexil) ftalato]	mg/kg	<10
NPE (nonilfenois e nonilfenois etoxilados)	mg/kg	<0,1
PAH (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos)	mg/kg	0,08
PCB (bifenilos policlorados)	mg/kg	<0,01
PCDD (dibenzo -p-dioxinas policloradas)	mg/kg	12
PCDF (dibenzofuranos policlorados)	mg/kg	12

Os dados referem-se à média e desvio padrão dos resultados de seis análises efetuadas ao composto

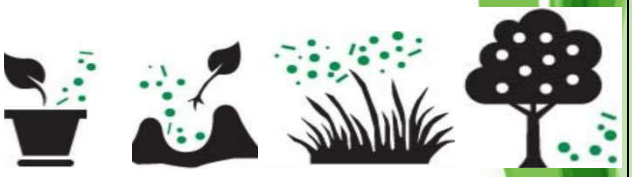
UTILIZAÇÃO

O FERBIO é compatível com todo o tipo de culturas.

Recomenda-se o recurso a técnicos para assegurar uma dosagem correta.

Devem ser realizadas análises ao solo antes da utilização de FERBIO.

A aplicação pode ser realizada antes da cultura sem ser necessário tempo de quarentena, diretamente na cultura ou utilizado diretamente em vaso.



Deve ser armazenado em lugar seco.

Forma de apresentação: pó

Prazo de Validade: 1 ano após aquisição

NORMAS DE SEGURANÇA

Deverá ser utilizada uma máscara adequada em áreas em que existam elevados níveis de poeira no ar.

Não permitir o pastoreio ou a utilização de culturas como forragem durante pelo menos 21 dias após a aplicação.

Responsável pela colocação do produto no mercado:
COMPONATURA, LDA
Estrada da Sapeira | 2350-620 Torres Novas
Tel.: 249 829 189
e-mail: geral@componatura.pt

Inscrição no Registo de Matérias Fertilizantes Não Harmonizadas sob o N.º de Registo da DGAE 409/2020

CODIMACO

Certificado

Componatura, Lda.

Preparador/Produtor – N.º REGISTO CODIMACO: C 963

A CODIMACO – Certificação e Qualidade, Lda. organismo de certificação, declara que o cliente acima referido submeteu as suas actividades a avaliação de acordo com a NP EN ISO 17065:2014, e que o produto obtido satisfaz os requisitos internos para composto apto para uso agrícola em Modo de Produção Integrada

Produto fabricado pelo preparador constante neste certificado

Este Certificado é válido até 06 de Agosto de 2026

A Responsável pelo Departamento de Certificação

CODIMACO
CERTIFICAÇÃO &

(Jacinta Saraiva).

Cadaval, 07 de Agosto de 2025

Componatura, Lda

Edifício Jardi, Variante do Bom Amor, 2350 – 649 Torres Novas

Anexo 1.15 – Avaliação Acústica – Relatório com referência n.º 26.3022.RAlE.Rlt1.Vrs1

Avaliação Acústica

Medição de níveis de pressão sonora. Determinação do nível sonoro médio de longa duração.

Requerente:	RIOS E AQUÍFEROS LDA.
Referência do Relatório:	26.3022.RAIE.Rlt1.Vrs1
Atividade:	EIA do "Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo (HMMN) – Artigo 16º"
Local do Ensaio:	Concelho Alcácer do Sal: Moitinha, Monte Novo e Cachopos
Processo:	Monitorização
Data dos Ensaios:	14 e 15/04/2026 20 e 21/04/2026
Data do Relatório:	28-05-2026
Total de Páginas: (anexos)	29

Tel. 966377750
Assinado por: **Rui Manuel Dias Leonardo**
Num. de Identificação: 11746441
Localização: Faro
CHAVE MÓVEL

SONOMETRIA
MEDIÇÕES DE SOM, PROJECTOS ACÚSTICOS, CONSULTORIA, HIGIENE E SEGURANÇA, LDA

RUA DA MINA 21 LOJA, BARRUNCHAL
2710-157 SINTRA

NC 504 704 745
t 214 264 806 | Comercial@sonometria.pt
www.sonometria.pt

Os resultados do ensaio referem-se exclusivamente aos valores medidos no local identificado no presente relatório.
Este relatório só pode ser produzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa da Sonometria.

ÍNDICE

1. CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO 3

1.1. Descrição e Objetivo 3

1.2. Dados Identificadores dos Ensaios 3

1.3. Definições 4

2. CONTEXTO LEGISLATIVO E PROCEDIMENTOS DE MEDIDA E DE CÁLCULO 6

2.1. Metodologia 6

2.2. Instrumentação e Medições 6

2.3. Condições meteorológicas 8

3. RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES 10

3.1. Dados Obtidos 10

3.2. Avaliação dos Valores Limite de Exposição 16

3.3. Interpretação dos Resultados e Conclusões 18

ANEXOS 19

A | LOCALIZAÇÃO E FOTOGRAFIAS 20

B| PLANO DE AMOSTRAGENS 22

C | CERTIFICADO DE ACREDITAÇÃO (L0535) 23

D | CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO E DE VERIFICAÇÃO DO SONÓMETRO 26

1. CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

1.1. Descrição e Objetivo

O presente relatório foi realizado no âmbito do EIA do "Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo (HMMN) – Artigo 16º".

O objetivo da presente Avaliação Acústica consiste na quantificação do ruído residual existente junto dos conjuntos de recetores localizados da área de potencial influência acústica do projeto, para determinação da Situação de Referência e pretende avaliar o cumprimento do denominado Critério de Exposição Máxima, estabelecido no artigo 11.º do Regulamento Geral do Ruído (Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro).

Na realização das medições dos níveis sonoros foi seguido o descrito nas Normas NP ISO 1996, Partes 1 e 2 (2021), e no Guia de Medições de Ruído Ambiente, da Agência Portuguesa do Ambiente (2020), sendo os resultados interpretados de acordo com os limites estabelecidos no Regulamento Geral do Ruído, Decreto-Lei n.º 9/2007, em vigor desde fevereiro de 2007.

1.2. Dados Identificadores dos Ensaios

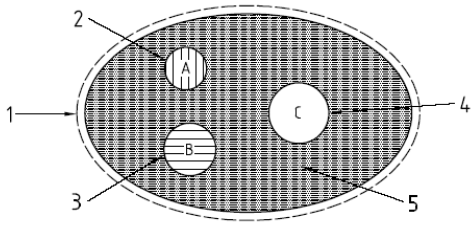
Requerente	**RIOS E AQUÍFEROS LDA.**
Atividade avaliada	**EIA do "Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo (HMMN) – Artigo 16º"**
Localização da atividade	**Concelho Alcácer do Sal: Moitinha, Monte Novo e Cachopos**
Local da medição exterior (Coordenadas ETRS89)	**PR1 (Moitinha): 38°24'25.76"N; 8°44'50.51"W** **PR2 (Herdade de Monte Novo): 38°24'23.43"N; 8°40'51.74"W** **PR3 (Cachopos): 38°23'47.85"N; 8°39'26.65"W** **PR4 (Herdade de Montalvo): 38°22'43.57"N; 8°38'39.82"W**
Identificação/Caracterização das Fontes de Ruído	**Tráfego rodoviário da EN253 e local; atividade agrícola; natureza (aerodinâmica vegetal)**
Horário de funcionamento da atividade	**-**

1.3. Definições

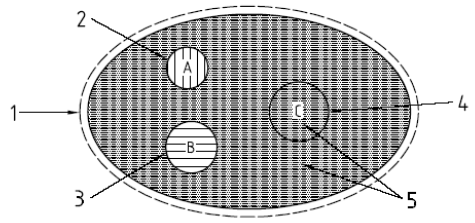
- **Designações do som introduzidas pelas Normas ISO 1996 (2021) -** No âmbito do Decreto-Lei nº 9/2007 "ruído ambiente" equivale a "som total"; "ruído particular" equivale a "som específico" e "ruído residual" equivale a "som residual".

- **Som total -** Som global existente numa dada situação e num dado instante, usualmente composto pelo som resultante de várias fontes, próximas e distantes.
- **Som específico -** Componente do som total que pode ser especificamente identificada e que está associada a uma determinada fonte.
- **Som residual -** Som remanescente numa dada posição e numa dada situação quando são suprimido(s) o(s) son(s) específico(s) em consideração.

Designações do som total, específico e residual



a) Três sons específicos em consideração (2, 3 e 4), o som residual (5) e o som total (1)



b) Dois sons específicos em consideração (2 e 3), o som residual (5) e o som total (1)
1 - som total; 2 - som específico A; 3 - som específico B; 4 - som específico C; 5 - som residual.

Notas : O nível sonoro residual mais baixo é obtido quando todos os sons específicos são suprimidos.
Em a) a área sombreada indica o som residual quando os sons específicos A,B e C são suprimidos.
Em b) o som residual inclui o som específico C dado que este não se encontra em consideração.

- **Som inicial -** Som total existente numa situação inicial antes da ocorrência de qualquer modificação.

- **Som flutuante -** Som contínuo cujo nível de pressão sonora, durante o período de observação, varia significativamente mas que não pode ser considerado um som impulsivo.

- **Som intermitente -** Sons observáveis apenas durante certos períodos de tempo, em intervalos regulares ou irregulares, em que a duração de cada uma das ocorrências é superior a 5 s.
Exemplo: Ruído de veículos motorizados em condições de baixo volume de tráfego, ruído de comboios, ruído de aeronaves, e ruído de compressores de ar.

- **Som impulsivo -** Som caracterizado por curtos impulsos de pressão sonora. A duração de um impulso de pressão sonora é, normalmente, inferior a 1 s.

- **Som tonal -** Som caracterizado por uma única componente de frequência ou por componentes de banda estreita que emergem de modo audível do som total.

- **Períodos de Referência** – "o intervalo de tempo a que se refere um indicador de ruído, de modo a abranger as atividades humanas típicas delimitado nos seguintes termos":
  - **Diurno** (07h00min. às 20h00min.)
  - **Entardecer** (20h00min. às 23h00min.)
  - **Noturno** (23h00min. às 07h00min.).
- **Ruído Ambiente** – "o ruído global observado numa dada circunstância num determinado instante, devido ao conjunto das fontes sonoras que fazem parte da vizinhança próxima ou longínqua do local considerado".

- **Ruído Particular** – "componente do ruído ambiente que pode ser especificamente identificada por meios acústicos e atribuída a uma determinada fonte sonora".

- **Ruído Residual** – "o ruído ambiente a que se suprimem um ou mais ruídos particulares, para uma situação determinada;

- **Nível Sonoro Contínuo Equivalente, Ponderado A, L_{Aeq},** de um ruído num intervalo de tempo - nível sonoro, em dB(A), de um ruído uniforme que contém a mesma energia acústica que o ruído referido naquele intervalo de tempo.

$$L_{Aeq} = 10\log_{10}\left[\frac{1}{T}\int_0^T 10^{\frac{LA(t)}{10}}\,dT\right]\mathrm{dB(A)}$$

sendo: $L_A\,(t)$ o valor instantâneo do nível sonoro em dB(A);
T o período de referência em que ocorre o ruído particular

- **Indicador de Ruído Diurno (L_d) ou (L_{day})** - "o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na norma NP 1730-1:1996, ou na versão atualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos diurnos representativos de um ano", expresso em dB(A) ;

- **Indicador de Ruído do Entardecer (L_e) ou ($L_{evening}$) -** "o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na norma NP 1730-1:1996, ou na versão atualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos do entardecer representativos de um ano", expresso em dB(A) ;

- **Indicador de Ruído Noturno (L_n) ou (L_{night}t) -** "o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na norma NP 1730-1:1996, ou na versão atualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos noturnos representativos de um ano", expresso em dB(A) ;

- **Indicador de Ruído Diurno-Entardecer-Noturno (L_{den})** - "o indicador de ruído, expresso em dB(A), associado ao incómodo global, dado pela expressão:

$$L_{den} = 10\times log\frac{1}{24}\left[13\times 10^{\frac{L_d}{10}} + 3\times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8\times 10^{\frac{L_n+10}{10}}\right]$$

- **Zonas Sensíveis** - "a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como café se outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno;

- **Zonas Mistas -** "a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível";

- **Zona Urbana Consolidada** - **"**a zona sensível ou mista com ocupação estável em termos de edificação".

2. CONTEXTO LEGISLATIVO E PROCEDIMENTOS DE MEDIDA E DE CÁLCULO

2.1. Metodologia

Nº	Ensaio	Método de Ensaio
7	Medição de níveis de pressão sonora. Determinação do nível sonoro médio de longa duração	NP ISO 1996-1:2021 NP ISO 1996-2:2021 SPT_08_RAMB_Lden_10

Os ensaios acústicos e os cálculos apresentados no presente relatório foram realizados de acordo com a normalização aplicável, nomeadamente nas Normas NP ISO 1996, Partes 1 e 2 (2021), e no Guia de Medições de Ruído Ambiente, da Agência Portuguesa do Ambiente (2020). A análise dos resultados é realizada de acordo com o Regulamento Geral do Ruído – Decreto-Lei nº 9/2007, de 17 de janeiro.

Na avaliação dos valores limite é verificado o disposto no **Capítulo III – Artigo 11º - Valores limite de exposição**, nomeadamente:
Número 1 *– Em função da classificação de uma zona como mista ou sensível, devem ser respeitados os seguintes valores limite de exposição:*

*- As **zonas mistas** não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A), expresso pelo indicador L_{den}, e superior a 55 dB(A), expresso pelo indicador L_n;*

*- As **zonas sensíveis** não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 55 dB(A), expresso pelo indicador L_{den}, e superior a 45 dB(A), expresso pelo indicador L_n;*

Número 3 *– Até à classificação das zonas sensíveis e mistas a que se referem os nºs 2 e 3 do artigo 6º, para efeitos de verificação do valor limite de exposição, aplicam-se aos recetores sensíveis os valores limites de L_{den} igual ou inferior a 63 dB(A) e L_n igual ou inferior a 53 dB(A).*

Incertezas:
De acordo com o "Guia prático para medições de ruído ambiente - no contexto do Regulamento Geral do Ruído tendo em conta a NP ISO 1996 - Julho 2020" da Agência Portuguesa do Ambiente (cap. 2.3.4), os resultados finais das medições/cálculos, a constarem do relatório do ensaio acústico, serão arredondados ao número inteiro e sem apresentação nem contabilização de incertezas, a fim de serem comparados com os valores-limite estabelecidos no RGR.

Os valores limite de exposição estabelecidos no artigo 11º do RGR, aprovado pelo Decreto-Lei 9/2007, constituem as regras de decisão seguidas, **para declarar a conformidade** com os requisitos legais.

2.2. Instrumentação e Medições

As medições foram efetuadas com recurso a equipamento de medição e ensaio adequado, nomeadamente:

- Sonómetro Analisador, de classe de precisão 1, Marca Solo 01 dB, Modelo Solo Premium, nº de Série 61277 e respetivo calibrador acústico Rion NC-74 nº de Série 34683823:
  Data da Última Verificação Periódica: junho de 2025;
  Certificado de Calibração número CL-42702RD-25 e de Verificação nº VP-42705ML-25.
- Sonómetro Analisador, de classe de precisão 1, Marca Solo 01 dB, Modelo Solo Master, nº de Série 61198 e respetivo calibrador acústico Rion NC-74 nº de Série 34883961:
  Data da Última Verificação Periódica: outubro de 2025;
  Certificado de Calibração número CL-64109RD-24 e de Verificação nº VP-75898ML-25.

- Termoanemómetro Marca Kestrel, Modelo 5500, SN 2154674, Certificados de Calibração CL-4639TH-25 de 2025-01-23 e CL-4638VA-25 de 2025-01-29 (termómetro e anemómetro, respetivamente).

Previamente ao início das medições, foi verificado o bom funcionamento do sonómetro, bem como os respetivos parâmetros de configuração. No início e no final de cada série de medições procedeu-se à calibração do sonómetro. O valor obtido no final do conjunto de medições não diferiu do inicial mais do que 0,5 dB(A). Quando este desvio é excedido o conjunto de medições não é considerado válido e é repetido com outro equipamento conforme ou depois de identificado e devidamente corrigida a causa do desvio, de acordo com os procedimentos definidos no Manual da Qualidade do Laboratório.

Nos pontos exteriores as medições de longa duração foram realizadas com o microfone do sonómetro situado a uma altura compreendida entre 1,2 m e 1,5 m ou 3,8 m a 4,2 m acima do solo m acima do solo, face à altura dos recetores sensíveis avaliados (1 ou 2 pisos).

As considerações expressas neste estudo seguem o estipulado no Regulamento Geral do Ruído, Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro, pelo que o principal parâmetro a considerar é o L_{Aeq} (nível sonoro contínuo equivalente).

No caso de se recorrer à técnica de amostragem é fundamental o conhecimento prévio do regime de funcionamento da fonte no período de referência em análise e no intervalo de tempo de longa duração em questão, para a escolha dos intervalos de tempo de medição (momento de recolha das medições, número de medições e respetiva duração).

Para fontes que não apresentem marcadas flutuações do nível sonoro ao longo do intervalo de tempo de referência nem marcados regimes de sazonalidade, deverão ser caracterizados pelo menos dois dias, cada um com pelo menos uma amostra, em cada um dos períodos de referência que estejam em causa. Por amostra entende-se um intervalo de tempo de observação que pode conter uma ou mais medições.

A média logarítmica de várias medições é calculada com a equação a seguir apresentada:

$$L_{Aeq,T} = 10 \times lg\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Aeq,t})i/10}\right]$$

Onde:
- n é o número de medições,
- $(L_{Aeq,t})_i$ é o valor do nível sonoro correspondente à medição i.

Para fontes que apresentem marcadas flutuações do nível sonoro ao longo do intervalo de tempo de referência que se apresentem associadas a ciclos distintos de funcionamento da fonte, devem ser efetuadas pelo menos duas amostras por ciclo. Para obter o valor do indicador de longa duração, mantém-se a necessidade de efetuar recolhas em pelo menos dois dias.

Quando é possível identificar a ocorrência de ciclos no ruído que se pretende caracterizar, deve ser aplicada a seguinte equação:

$$L_{Aeq,T} = 10 \times lg\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} t_i \times 10^{(L_{Aeq,t})i/10}\right]$$

Onde:
- n é o número de medições,
- t_i é a duração do ciclo i,
- $(L_{Aeq,t})_i$ é o valor do nível sonoro correspondente à medição i.
- $T = \sum t_i$ corresponde à duração total de ocorrência do ruído a caracterizar, no período de referência em análise.

A duração de cada medição é determinada fundamentalmente pela estabilização do sinal sonoro em termos de $L_{Aeq,t}$, a avaliar pelo operador do sonómetro. Regra geral, para ensaios no interior, a duração mínima de cada medição deve ser de 10 minutos; para ensaios no exterior, a duração mínima deve ser de 15 minutos devido, normalmente, à multiplicidade de fontes e à variabilidade das condições de propagação que influenciam o registo de medição.

Sempre que a fonte sonora for caracterizada por acontecimentos acústicos discretos, o valor do indicador de longa duração L_d, L_e, L_n ou $L_{Aeq,T}$ (mensal), pode ser calculado a partir dos valores médios de níveis de exposição sonora LAE associados a cada tipo de acontecimentos, ponderados em função das suas ocorrências relativas no intervalo de tempo de longa duração em causa.

Para cada tipo de acontecimento acústico discreto tem-se

$$L_{Aeq,T} = \overline{L_{AE}} + 10 \times lg\, n - 10 \times lg(\frac{T}{t_0})$$

Onde:

- L_{AE} é o nível de exposição sonora média de n acontecimentos acústicos do mesmo tipo, no intervalo de tempo T (em segundos),
- t_0=1 segundo.

No presente caso as amostragens foram efetuadas em conformidade com o Procedimento do Laboratório, 3 amostragens de 15 minutos cada num dia, e mais 3 amostragens de 15 minutos noutro dia. Realização de uma amostragem acrescida quando ocorrem diferenciais superiores a 5 dB entre amostras, tal como se descreve no Anexo B – Plano de Amostragens.

2.3. Condições meteorológicas

As condições meteorológicas verificadas em cada medição são apresentadas nos quadros do capítulo seguinte.

De forma a efetuar uma extrapolação de medições a longa duração, para cada ponto de medição ou recetor avaliado são efetuadas as correções C_{met} ao ruído ambiente (incluindo ruído particular avaliado em condições de propagação favoráveis à propagação sonora da fonte em avaliação):

Ld de Longa Duração = Ld - C_{met} diurno
Le de Longa Duração = Le - C_{met} entardecer
Ln de Longa Duração = Ln - C_{met} noturno
Nota :
C_{met} = 0 se dp ≤ 10(hs+hr) ≈ (hs+hr)/dp ≥ 0.1
e
C_{met} = C0 [1-10(hs+hr)/dp] se dp > 10(hs+hr) ≈ (hs+hr)/dp < 0.1
Onde:
hs – Altura relativa da(s) fonte(s) em metros.
hr – Altura relativa do microfone em metros.
dp – Distância linear entre a(s) fonte(s) e o microfone (ou entre a fonte e o recetor) em metros.
C0 – Facto que epende das estatísticas mete reológicas locais, da velocidade e direção do vento e dos gradientes de temperatura, em dB(A); para o território nacional considera-se C0 diurno = 1,47 dB(A), C0 do Entardecer = 0,7 dB(A) e C0 noturno = 0 dB(A). No caso de medições desfavoráveis, o valor de C0, para converter em condições favoráveis é C0 = -10dB.

As correções C_{met} deverão ser efetuadas sobre o ruído ambiente (que inclui ruído particular de determinada atividade avaliada), sempre que o ponto recetor esteja sujeito à influência significativa dessa determinada fonte sonora.

Sempre que se concluir que o ponto recetor está sujeito à influência das condições meteorológicas (isto é, quando não se verificar a fórmula (11) da NP ISO 1996-2(*), aplicável a solo poroso), os procedimentos de medição por técnica de amostragem devem ser efetuados preferencialmente sob condições favoráveis ou muito favoráveis à propagação sonora (secção 8.2 da NP ISO 1996-2).

Neste caso, de acordo com a NP ISO 1996-2:2021 as medições de curta duração (uma amostra, ou poucas) devem ser realizadas durante condições favoráveis ou muito favoráveis de propagação sonora, correspondentes às janelas meteorológicas M3 e M4, respetivamente, conforme definido no quadro 2. Estas janelas meteorológicas correspondem às situações em que o valor típico da componente vetorial da velocidade do vento a 10 m de altura se situa entre os 3 m/s e os 6 m/s, janela meteorológica M3 ou favorável, e às situações em que o valor típico da componente vetorial da velocidade do vento a 10 m de altura é superior a 6 m/s, durante o dia, ou superior ou igual a – 1 m/s, durante a noite, janela meteorológica M4 ou muito favorável.

As janelas meteorológicas encontram-se definidas no quadro 4 da norma NP ISO 1996-2, que se transcreve no quadro seguinte.

Janelas meteorológicas	Alcance D/R_{cur}	Valor representativo D/R_{cur}	Descrição verbal
M1a)	< - 0,04	- 0,08	Desfavorável
M2b)	- 0,04 … 0,04	0,00	Neutro ou homogéneo
M3c)	0,04 … 0,12	0,08	Favorável
M4d)	> 0,12	0,16	Muito favorável

a) Valor típico da componente vetorial da velocidade do vento a 10 m: < 1 m/s e < - 1 m/s, respetivamente para o dia e para a noite.
b) Valor típico da componente vetorial da velocidade do vento a 10 m: 1 m/s a 3 m/s.
c) Valor típico da componente vetorial da velocidade do vento a 10 m: 3 m/s a 6 m/s.
d) Valor típico da componente vetorial da velocidade do vento a 10 m:> 6 m/s e ≥ - 1 m/s, respetivamente para o dia e para a noite.

No caso em apreço as medições efetuadas pretenderam caraterizar o ambiente sonoro global existente, decorrente da conjugação de todas as fontes de ruído envolventes, sendo a principal fonte sonora com relevância nos resultados, o ruído do tráfego rodoviário e a natureza.

Todas as medições efetuadas cumprem as condições anteriormente apresentadas, considera-se que os resultados obtidos são independentes das condições atmosféricas.

3. RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES

3.1. Dados Obtidos

Os resultados (médios) das medições de ruído ambiente no exterior realizadas para os três períodos são apresentados nos quadros seguintes.

Os resultados apresentados referem-se exclusivamente aos itens ensaiados. Os resultados apresentados são válidos nas condições do ruído verificadas nos momentos em que decorreram as medições.

Ponto PR1 - Período Diurno (07h-20h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #133**	14/04/2026	Das 16:28 às 16:43	**46,8**	51,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 82%
Med.2 **Mem. #134**	14/04/2026	Das 16:43 às 16:58	**47,1**	51,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 82%
Med.3 **Mem. #135**	14/04/2026	Das 16:58 às 17:13	**48,7**	51,4	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 82%
Med.4 **Mem. #208**	21/04/2026	Das 9:16 às 9:31	**46,8**	48,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 71%
Med.5 **Mem. #209**	21/04/2026	Das 9:31 às 9:46	**47,3**	51,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 71%
Med.6 **Mem. #210**	21/04/2026	Das 9:46 às 10:01	**46,4**	48,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 71%

Ponto PR1 - Período do Entardecer (20h-23h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #136**	14/04/2026	Das 20:18 às 20:33	**42,9**	48,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 14ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 88%
Med.2 **Mem. #137**	14/04/2026	Das 20:33 às 20:48	**42,3**	45,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 14ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 88%
Med.3 **Mem. #138**	14/04/2026	Das 20:48 às 21:03	**45,0**	47,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 14ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 88%
Med.4 **Mem. #196**	20/04/2026	Das 22:11 às 22:26	**43,8**	47,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%
Med.5 **Mem. #197**	20/04/2026	Das 22:26 às 22:41	**42,4**	46,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%
Med.6 **Mem. #198**	20/04/2026	Das 22:41 às 22:56	**43,1**	46,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%

Ponto PR1 - Período Noturno (23h-07h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #152**	15/04/2026	Das 0:58 às 1:13	**42,1**	46,6	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 94%
Med.2 **Mem. #153**	15/04/2026	Das 1:13 às 1:28	**40,9**	45,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 94%
Med.3 **Mem. #154**	15/04/2026	Das 1:28 às 1:43	**43,2**	45,9	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 94%
Med.4 **Mem. #199**	20/04/2026	Das 23:11 às 23:26	**44,0**	46,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%
Med.5 **Mem. #200**	20/04/2026	Das 23:26 às 23:41	**41,1**	43,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%
Med.6 **Mem. #201**	20/04/2026	Das 23:41 às 23:56	**43,3**	45,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego esporádico audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%

Ponto PR2 - Período Diurno (07h-20h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #130**	14/04/2026	Das 15:31 às 15:46	**43,8**	48,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Atividade agrícola pontualmente percetível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 83%
Med.2 **Mem. #131**	14/04/2026	Das 15:46 às 16:01	**43,1**	46,6	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Atividade agrícola pontualmente percetível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 83%
Med.3 **Mem. #132**	14/04/2026	Das 16:01 às 16:16	**45,2**	50,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Atividade agrícola pontualmente percetível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 83%
Med.4 **Mem. #211**	21/04/2026	Das 10:11 às 10:26	**44,7**	47,9	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Atividade agrícola pontualmente percetível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 68%
Med.5 **Mem. #212**	21/04/2026	Das 10:26 às 10:41	**46,2**	49,1	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Atividade agrícola pontualmente percetível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 68%
Med.6 **Mem. #213**	21/04/2026	Das 10:41 às 10:56	**43,5**	47,1	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Atividade agrícola pontualmente percetível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 68%

Ponto PR2 - Período do Entardecer (20h-23h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #140**	14/04/2026	Das 21:11 às 21:26	**41,8**	45,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 13ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 90%
Med.2 **Mem. #141**	14/04/2026	Das 21:26 às 21:41	**42,6**	47,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 13ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 90%
Med.3 **Mem. #142**	14/04/2026	Das 21:41 às 21:56	**43,4**	47,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 13ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 90%
Med.4 **Mem. #190**	20/04/2026	Das 20:14 às 20:29	**42,1**	45,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 73%
Med.5 **Mem. #191**	20/04/2026	Das 20:29 às 20:44	**42,1**	45,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 73%
Med.6 **Mem. #192**	20/04/2026	Das 20:44 às 20:59	**41,6**	46,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 73%

Os resultados do ensaio referem-se exclusivamente aos valores medidos no local identificado no presente relatório.
Este relatório só pode ser produzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa da Sonometria.

Ponto PR2 - Período Noturno (23h-07h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #149**	15/04/2026	Das 0:04 às 0:19	**40,8**	45,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 94%
Med.2 **Mem. #150**	15/04/2026	Das 0:19 às 0:34	**42,9**	47,4	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 94%
Med.3 **Mem. #151**	15/04/2026	Das 0:34 às 0:49	**41,3**	44,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 94%
Med.4 **Mem. #205**	21/04/2026	Das 1:02 às 1:17	**39,9**	42,6	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 76%
Med.5 **Mem. #206**	21/04/2026	Das 1:17 às 1:32	**40,6**	43,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 76%
Med.6 **Mem. #207**	21/04/2026	Das 1:32 às 1:47	**41,3**	45,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 76%

Ponto PR3 - Período Diurno (07h-20h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #127**	14/04/2026	Das 14:38 às 14:53	**43,8**	47,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 79%
Med.2 **Mem. #128**	14/04/2026	Das 14:53 às 15:08	**45,5**	47,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 79%
Med.3 **Mem. #129**	14/04/2026	Das 15:08 às 15:23	**44,1**	46,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 79%
Med.4 **Mem. #214**	21/04/2026	Das 11:08 às 11:23	**43,6**	48,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 20ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 62%
Med.5 **Mem. #215**	21/04/2026	Das 11:23 às 11:38	**44,5**	48,4	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 20ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 62%
Med.6 **Mem. #216**	21/04/2026	Das 11:38 às 11:53	**43,9**	47,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 20ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 62%

Ponto PR3 - Período do Entardecer (20h-23h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #143**	14/04/2026	Das 22:09 às 22:24	**40,2**	45,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.2 **Mem. #144**	14/04/2026	Das 22:24 às 22:39	**43,1**	47,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.3 **Mem. #145**	14/04/2026	Das 22:39 às 22:54	**38,2**	43,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.4 **Mem. #193**	20/04/2026	Das 21:09 às 21:24	**42,3**	44,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 75%
Med.5 **Mem. #194**	20/04/2026	Das 21:24 às 21:39	**39,1**	43,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 75%
Med.6 **Mem. #195**	20/04/2026	Das 21:39 às 21:54	**40,1**	44,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 75%

Ponto PR3 - Período Noturno (23h-07h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #146**	14/04/2026	Das 23:08 às 23:23	**39,7**	43,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.2 **Mem. #147**	14/04/2026	Das 23:23 às 23:38	**41,2**	44,6	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.3 **Mem. #148**	14/04/2026	Das 23:38 às 23:53	**40,3**	43,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.4 **Mem. #202**	21/04/2026	Das 0:07 às 0:22	**39,5**	44,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 76%
Med.5 **Mem. #203**	21/04/2026	Das 0:22 às 0:37	**39,9**	44,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 76%
Med.6 **Mem. #204**	21/04/2026	Das 0:37 às 0:52	**39,7**	41,6	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante pouco audível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 76%

Os resultados do ensaio referem-se exclusivamente aos valores medidos no local identificado no presente relatório.
Este relatório só pode ser produzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa da Sonometria.

Ponto PR4 - Período Diurno (07h-20h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #423**	14/04/2026	Das 13:50 às 14:05	**43,2**	48,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante percetível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 77%
Med.2 **Mem. #424**	14/04/2026	Das 14:05 às 14:20	**41,1**	45,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante percetível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 77%
Med.3 **Mem. #425**	14/04/2026	Das 14:20 às 14:35	**43,5**	46,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Tráfego distante percetível; Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 77%
Med.4 **Mem. #438**	21/04/2026	Das 7:15 às 7:30	**41,2**	43,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 86%
Med.5 **Mem. #439**	21/04/2026	Das 7:30 às 7:45	**42,6**	46,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 86%
Med.6 **Mem. #440**	21/04/2026	Das 7:45 às 8:00	**40,1**	44,8	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 16ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 86%

Ponto PR4 - Período do Entardecer (20h-23h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #426**	14/04/2026	Das 21:10 às 21:25	**40,6**	44,0	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 13ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 90%
Med.2 **Mem. #427**	14/04/2026	Das 21:25 às 21:40	**39,2**	41,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 13ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 90%
Med.3 **Mem. #428**	14/04/2026	Das 21:40 às 21:55	**40,9**	45,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 13ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 90%
Med.4 **Mem. #432**	20/04/2026	Das 22:00 às 22:15	**37,9**	42,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%
Med.5 **Mem. #433**	20/04/2026	Das 22:15 às 22:30	**40,3**	44,2	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%
Med.6 **Mem. #434**	20/04/2026	Das 22:30 às 22:45	**38,9**	42,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 17ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento SE; HR 77%

Os resultados do ensaio referem-se exclusivamente aos valores medidos no local identificado no presente relatório.
Este relatório só pode ser produzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa da Sonometria.

Ponto PR4 - Período Noturno (23h-07h) - Medições de Ruído Ambiente

ID	Data	Intervalo de medição	$L_{Aeq\ fast}$ [dB(A)]	$L_{Aeq\ imp.}$ [dB(A)]	Componentes Penalizantes	Observações
Med.1 **Mem. #429**	14/04/2026	Das 23:10 às 23:25	**38,9**	42,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.2 **Mem. #430**	14/04/2026	Das 23:25 às 23:40	**40,1**	44,6	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.3 **Mem. #431**	14/04/2026	Das 23:40 às 23:55	**39,4**	41,7	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 12ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento NW; HR 93%
Med.4 **Mem. #435**	21/04/2026	Das 4:00 às 4:15	**39,5**	43,3	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 14ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 88%
Med.5 **Mem. #436**	21/04/2026	Das 4:15 às 4:30	**39,9**	41,9	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 14ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 88%
Med.6 **Mem. #437**	21/04/2026	Das 4:30 às 4:45	**38,6**	42,5	Tonais: Não Impulsivas: Não	Natureza pouco audível. Temp. 14ºC; Vel. Vento 1-2 m/s; Direç. Vento S; HR 88%

3.2. Avaliação dos Valores Limite de Exposição

(verificação do artigo 11º, do Regulamento Geral do Ruído)

* No âmbito da competência estabelecida no artigo 6º do RGR, o Município de Alcácer do Sal estabeleceu o zonamento acústico da totalidade do território do concelho, na seção II – Ruído, Artigo 13.º – Classificação Acústica, do Regulamento do PDM de Alcácer do Sal, aprovado pelo Aviso 13020/2017, com as alterações introduzidas pela 3ª Alteração por Adaptação, aprovada pelo Declaração n.º 128/2025/2, de 02-09-2025, na redação atual, estabelece: *"1 — Para efeitos do Regulamento Geral do Ruído, adiante abreviadamente designado por RGR, todo o território municipal é classificado como zona mista, não devendo ficar exposto a níveis sonoros de ruído ambiente exterior superiores aos definidos naquele Regulamento.(…)"*

Neste contexto, **o ambiente sonoro nos locais analisados** no âmbito do Regulamento Geral do Ruído (Decreto-Lei 9/2007), têm a verificar os limites estabelecido na alínea a), número 1 e do artigo 11º, do RGR: **zona mista – Lden ≤ 65 dB(A) e Ln ≤ 55 dB(A)**.

Considerando os valores expostos nos quadros anteriores, em seguida apresentam-se os resultados (média logarítmica):

PR1 - Período Diurno (07h-20h) **Período do Entardecer (20h-23h)** **Período Nocturno (23h-07h)**

ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_d [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_e [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_n [dB(A)]	L_{den} [dB(A)]
Med.1	14/04/2026	**46,8**	**47,2**	Med.1	14/04/2026	**42,9**	**43,4**	Med.1	15/04/2026	**42,1**	**42,6**	**49,9**
Med.2	14/04/2026	**47,1**		Med.2	14/04/2026	**42,3**		Med.2	15/04/2026	**40,9**		
Med.3	14/04/2026	**48,7**		Med.3	14/04/2026	**45,0**		Med.3	15/04/2026	**43,2**		
Med.4	21/04/2026	**46,8**		Med.4	20/04/2026	**43,8**		Med.4	20/04/2026	**44,0**		
Med.5	21/04/2026	**47,3**		Med.5	20/04/2026	**42,4**		Med.5	20/04/2026	**41,1**		
Med.6	21/04/2026	**46,4**		Med.6	20/04/2026	**43,1**		Med.6	20/04/2026	**43,3**		

PR2 - Período Diurno (07h-20h) **Período do Entardecer (20h-23h)** **Período Nocturno (23h-07h)**

ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_d [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_e [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_n [dB(A)]	L_{den} [dB(A)]
Med.1	14/04/2026	**43,8**	**44,6**	Med.1	14/04/2026	**41,8**	**42,3**	Med.1	15/04/2026	**40,8**	**41,2**	**48,2**
Med.2	14/04/2026	**43,1**		Med.2	14/04/2026	**42,6**		Med.2	15/04/2026	**42,9**		
Med.3	14/04/2026	**45,2**		Med.3	14/04/2026	**43,4**		Med.3	15/04/2026	**41,3**		
Med.4	21/04/2026	**44,7**		Med.4	20/04/2026	**42,1**		Med.4	21/04/2026	**39,9**		
Med.5	21/04/2026	**46,2**		Med.5	20/04/2026	**42,1**		Med.5	21/04/2026	**40,6**		
Med.6	21/04/2026	**43,5**		Med.6	20/04/2026	**41,6**		Med.6	21/04/2026	**41,3**		

PR3 - Período Diurno (07h-20h) **Período do Entardecer (20h-23h)** **Período Nocturno (23h-07h)**

ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_d [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_e [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_n [dB(A)]	L_{den} [dB(A)]
Med.1	14/04/2026	**43,8**	**44,3**	Med.1	14/04/2026	**40,2**	**40,8**	Med.1	14/04/2026	**39,7**	**40,1**	**47,3**
Med.2	14/04/2026	**45,5**		Med.2	14/04/2026	**43,1**		Med.2	14/04/2026	**41,2**		
Med.3	14/04/2026	**44,1**		Med.3	14/04/2026	**38,2**		Med.3	14/04/2026	**40,3**		
Med.4	21/04/2026	**43,6**		Med.4	20/04/2026	**42,3**		Med.4	21/04/2026	**39,5**		
Med.5	21/04/2026	**44,5**		Med.5	20/04/2026	**39,1**		Med.5	21/04/2026	**39,9**		
Med.6	21/04/2026	**43,9**		Med.6	20/04/2026	**40,1**		Med.6	21/04/2026	**39,7**		

PR4 - Período Diurno (07h-20h) **Período do Entardecer (20h-23h)** **Período Nocturno (23h-07h)**

ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_d [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_e [dB(A)]	ID	Data	$L_{Aeq\ fast}$ Parcial [dB(A)]	L_n [dB(A)]	L_{den} [dB(A)]
Med.1	14/04/2026	**43,2**	**42,1**	Med.1	14/04/2026	**40,6**	**39,8**	Med.1	14/04/2026	**38,9**	**39,4**	**46,2**
Med.2	14/04/2026	**41,1**		Med.2	14/04/2026	**39,2**		Med.2	14/04/2026	**40,1**		
Med.3	14/04/2026	**43,5**		Med.3	14/04/2026	**40,9**		Med.3	14/04/2026	**39,4**		
Med.4	21/04/2026	**41,2**		Med.4	20/04/2026	**37,9**		Med.4	21/04/2026	**39,5**		
Med.5	21/04/2026	**42,6**		Med.5	20/04/2026	**40,3**		Med.5	21/04/2026	**39,9**		
Med.6	21/04/2026	**40,1**		Med.6	20/04/2026	**38,9**		Med.6	21/04/2026	**38,6**		

Assim, os **indicadores de longa duração L_{den} e L_n obtidos** (tendo em conta as regras de arredondamento aplicáveis, para comparação aos limites legais) são:

PR1: L_n = 43 dB(A); L_{den} = 50 dB(A)

PR2: L_n = 41 dB(A); L_{den} = 48 dB(A)

PR3: L_n = 40 dB(A); L_{den} = 47 dB(A)

PR4: L_n = 39 dB(A); L_{den} = 46 dB(A)

De acordo com os resultados apresentados, **os indicadores de longa duração L_{den} e L_n obtidos cumprem os valores limite de exposição aplicáveis - zona mista** – Lden ≤ 65 dB(A) e Ln ≤ 55 dB(A), conforme estabelecido na alínea a), número 1 do artigo 11º, do RGR.

3.3. Interpretação dos Resultados e Conclusões

Perante os resultados obtidos, no âmbito do **EIA do "Projeto Agroflorestal das Herdades de Murta e Monte Novo (HMMN) – Artigo 16º", conclui-se que os níveis sonoros de longa duração junto dos recetores sensíveis caracterizados**, analisados no âmbito dos Valores Limite de Exposição, **cumprem os valores limite de exposição aplicáveis**, conforme estabelecido no artigo 11º do Regulamento Geral do Ruído, aprovado pelo Decreto-Lei 9/2007, de 17 de janeiro, na redação atual.

Os pareceres e as opiniões assinalados com (*) não estão incluídos no âmbito da acreditação.

28-05-2026

Elaborado:	**Verificado e Aprovado por:**
	
RUI LEONARDO (Técnico de Laboratório) | Eng. do Ambiente |	JOÃO PEDRO SILVA (Diretor da Qualidade) | Eng.º Mc., D.F.A. Eng.ª Acústica |

ANEXOS

A | LOCALIZAÇÃO E FOTOGRAFIAS

B | PLANO DE AMOSTRAGENS

C | CERTIFICADO DE ACREDITAÇÃO (L0535)

D | CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO E DE VERIFICAÇÃO DO SONÓMETRO

Os resultados do ensaio referem-se exclusivamente aos valores medidos no local identificado no presente relatório.
Este relatório só pode ser produzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa da Sonometria.

A | LOCALIZAÇÃO E FOTOGRAFIAS

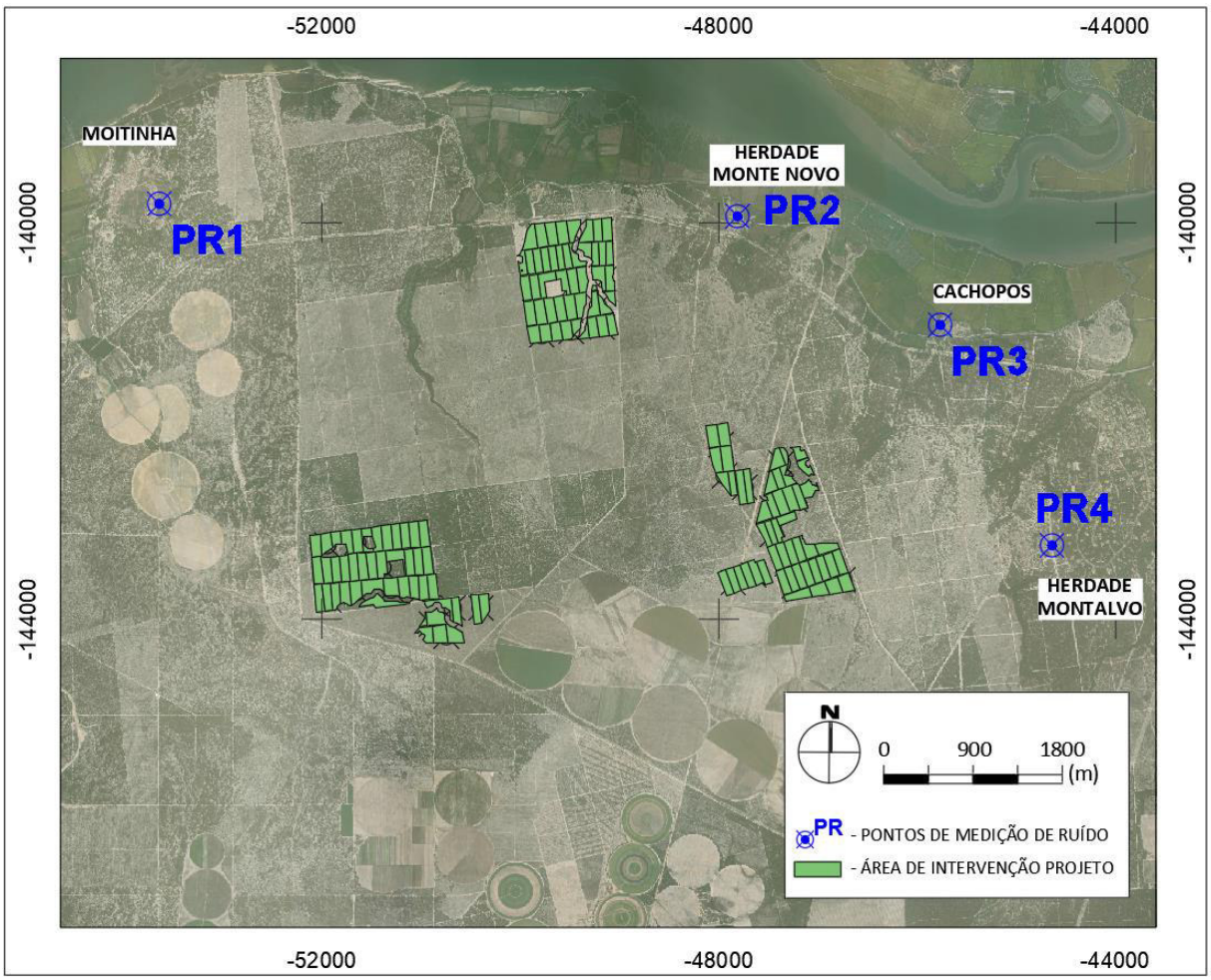


Figura 1 – Localização dos pontos de medição RS_003



Figura 2 – Apontamento fotográfico pontos PR1



Figura 3 – Apontamento fotográfico pontos PR2



Figura 4 – Apontamento fotográfico pontos PR3



Figura 5 – Apontamento fotográfico pontos PR4

B| PLANO DE AMOSTRAGENS

Este anexo tem como objetivo apresentar a análise efetuada em termos de representatividade do Plano de mostragens selecionado.

1- Qual o Plano de Amostragens usado no presente Estudo?

☒ Plano Geral; ☐ Outro Plano.

2- Descrição geral do tipo(s) de fonte(s) de ruído em análise:

☒ Tráfego rodoviário; ☐ Tráfego ferroviário; ☐ Tráfego aéreo; ☐ Indústria; ☒ Outra (natureza)

Especificidade da fonte com influência na representatividade: Nada a assinalar

3- Descrição e justificação da adequabilidade do Plano de Amostragens Geral para o presente Estudo:

Descrição do Plano de Amostragens Geral: 3 amostras de 10/15 minutos (interior/exterior) em 1 dia e 3 amostra de 10/15 minutos em outro dia. Se a diferença entre amostragens for superior a 5 dB realizar nova amostragem.

Justificação do Plano de Amostragens Geral: A informação administrativa obtida e o observado *in situ* não evidenciam qualquer caraterística especial da fonte de ruído em apreço que permita concluir, à partida, pela inadequabilidade do Plano de Amostragens geral para o presente Estudo.

4- Descrição e justificação da adequabilidade do Outro Plano de Amostragens para o presente Estudo:

Descrição do Outro Plano de Amostragens: Nada a assinalar.

Justificação do Outro Plano de Amostragens: Nada a assinalar.

5- Comentários:

Nada a assinalar.

C | CERTIFICADO DE ACREDITAÇÃO (L0535)

INSTITUTO PORTUGUÊS DE ACREDITAÇÃO IPAC acreditação
PORTUGUESE ACCREDITATION INSTITUTE
Rua António Gião, 2-4º 2829-513 CAPARICA Portugal
Tel +351.218 732 400
acredita@ipac.pt • www.ipac.pt

Anexo Técnico de Acreditação L0535-1

Accreditation Technical Annex

A entidade a seguir indicada está acreditada como Laboratório de Ensaios, segundo a norma **NP EN ISO/IEC 17025:2018**

The body indicated below is accredited as a Testing Laboratory according to ISO/IEC 17025

Sonometria, Medições de Som, Projectos Acústicos, Consultoria, Higiene e Segurança, Lda.
Laboratório

Endereço *Address*	Rua da Mina 21 - Loja Barrunchal 2710-157 Sintra
Contacto *Contact*	João Pedro Silva
Telefone	214264806
Fax	----------
E-mail	joao.pedro.silva@sonometria.pt
Internet	http://www.sonometria.pt

Resumo do Âmbito Acreditado / *Accreditation Scope Summary*

Acústica e Vibrações / *Acoustics and Vibrations*

Nota: ver na(s) página(s) seguinte(s) a descrição completa do âmbito de acreditação.

Note: see in the next page(s) the detailed description of the accredited scope.

Este Anexo Técnico é válido desde 2024-04-18 e substitui o(s) anteriormente emitido(s) com o mesmo código.
Este Anexo Técnico pode ser sujeito a modificações, suspensões temporárias e eventual anulação, pelo que a sua atualização e validade devem ser confirmadas no Diretório de Entidades Acreditadas do IPAC, disponível em www.ipac.pt ou clicando na ligação abaixo:
http://www.ipac.pt/docsig/?AR32-75FW-4FH7-R53N

This Technical Annex is valid from the date on the left and replaces those previously issued with the same code. Its validity can be checked in the website hyperlink on the left.

Os ensaios podem ser realizados segundo as seguintes categorias:

0 Ensaios realizados nas instalações permanentes do laboratório
1 Ensaios realizados fora das instalações do laboratório ou em laboratórios móveis
2 Ensaios realizados nas instalações permanentes do laboratório e fora destas

Testing may be performed according to the following categories:

0 Testing performed at permanent laboratory premises
1 Testing performed outside the permanent laboratory premises or at a mobile laboratory
2 Testing performed at the permanent laboratory premises and outside

INSTITUTO PORTUGUÊS DE ACREDITAÇÃO IPAC acreditação
PORTUGUESE ACCREDITATION INSTITUTE
Rua António Gião, 2-4º 2829-513 CAPARICA Portugal
Tel +351.218 732 400
acredita@ipac.pt • www.ipac.pt

Anexo Técnico de Acreditação L0535-1

Accreditation Technical Annex

Sonometria, Medições de Som, Projectos Acústicos, Consultoria, Higiene e Segurança, Lda.
Laboratório

Nº *Nr*	Produto *Product*	Ensaio *Test*	Método de Ensaio *Test Method*	Categoria *Category*
ACÚSTICA E VIBRAÇÕES *ACOUSTICS AND VIBRATIONS*				
1	Acústica de edifícios	Medição do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e elementos de fachada e determinação do índice de isolamento sonoro, excetuando o isolamento sonoro padronizado de baixa frequência em compartimentos de volume inferior a 25m3 Método global com ruído de tráfego rodoviário,	NP EN ISO 16283-3:2017 NP EN ISO 717-1:2021	1
2	Acústica de edifícios	Medição do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e elementos de fachada e determinação do índice de isolamento sonoro, excetuando o isolamento sonoro padronizado de baixa frequência em compartimentos de volume inferior a 25m3. Método global com altifalante	NP EN ISO 16283-3:2017 NP EN ISO 717-1:2021	1
3	Acústica de edifícios	Medição do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos e determinação do índice de isolamento sonoro, excetuando o isolamento sonoro padronizado de baixa frequência em compartimentos de volume inferior a 25m3	NP EN ISO 16283-1:2014 NP EN ISO 16283-1:2014/A1:2019 NP EN ISO 717-1:2021	1
4	Acústica de edifícios	Medição do isolamento sonoro a sons de percussão de pavimentos e determinação do índice de isolamento sonoro, excetuando o isolamento sonoro padronizado de baixa frequência em compartimentos de volume inferior a 25m3	NP EN ISO 16283-2:2021 NP EN ISO 717-2:2021	1
5	Acústica de edifícios	Medição do tempo de reverberação. Método da resposta impulsiva integrada (método de engenharia)	NP EN ISO 3382-2:2015	1
6	Acústica de edifícios	Medição dos níveis de pressão sonora de equipamentos de edifícios. Determinação do nível sonoro do ruído particular	NP EN ISO 16032:2009 Nota 4 do Documento LNEC 16 março 2023	1
7	Ruído Ambiente	Medição de níveis de pressão sonora. Determinação do nível sonoro médio de longa duração	NP ISO 1996-1:2021 NP ISO 1996-2:2021 SPT_08_RAMB_Lden_11	1
8	Ruído Ambiente	Medição dos níveis de pressão sonora. Critério de incomodidade	NP ISO 1996-1:2021 NP ISO 1996-2:2021 Anexo I do Decreto-Lei nº 9/2007 SPT_07_INCO_10	1
9	Ruído Ambiente	Medição dos níveis de pressão sonora. Determinação do nível sonoro contínuo equivalente	NP ISO 1996-1:2021 NP ISO 1996-2:2021 SPT_09_RAMB_Leq_07	1
		FIM *END*		

Notas:
Notes:
- "SPT-*" indica Procedimento Interno do Laboratório.

Os resultados do ensaio referem-se exclusivamente aos valores medidos no local identificado no presente relatório.
Este relatório só pode ser produzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa da Sonometria.

INSTITUTO PORTUGUÊS DE ACREDITAÇÃO IPAC acreditação
PORTUGUESE ACCREDITATION INSTITUTE
Rua António Gião, 2-4º 2829-513 CAPARICA Portugal
Tel +351.218 732 400
acredita@ipac.pt • www.ipac.pt

Anexo Técnico de Acreditação L0535-1

Accreditation Technical Annex

Sonometria, Medições de Som, Projectos Acústicos, Consultoria, Higiene e Segurança, Lda.
Laboratório

- A acreditação para uma dada norma internacional abrange a acreditação para as correspondentes normas regionais adotadas ou nacionais homologadas (i.e., "ISO abc" equivale a "EN ISO abc" e "NP EN ISO abc" ou UNE EN ISO abc, NF EN ISO abc, etc...).

Documento assinado eletronicamente por
Paulo Tavares
Vice-Presidente

Os resultados do ensaio referem-se exclusivamente aos valores medidos no local identificado no presente relatório.
Este relatório só pode ser produzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa da Sonometria.

Trescal

IPAC acreditação L0531 ISO/IEC 17025 Ensaios — ilac-MRA

Despacho de Qualificação IPQ Nº 541/2023

Etiqueta Nº: 2025-001-392383-4

Certificado de Verificação

Número 245.71-00690

Ref.ª do Serviço VP-42705ML-25

ENTIDADE

NOME Sonometria, Medições de Som, Projecto Acústico, Consultoria, Higiene e Segurança Lda

ENDEREÇO Rua da Mina nº 21

2710-157 - Sintra

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Sonómetro com integrador

CONSTITUIÇÃO	SONÓMETRO	MICROFONE	PRÉ-AMPLIFICADOR	CALIBRADOR
MARCA	01dB	01dB	01dB	RION
MODELO	Solo Premium	MCE 212	PRE 21 S	NC-74
NÚMERO SÉRIE	61277	93925	14450	34683823

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO 1

RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR 0,1 dB

DESPACHO DE APROVAÇÃO DE MODELO 245.70.04.3.56

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Verificação Periódica

DATA 25/06/2025

MÉTODO Comparação

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA Portaria nº 370/2023 de 15 de novembro e Proc. EIA PV 2501, Edição A, Revisão 00.

RASTREABILIDADE METROLÓGICA Às unidades SI, através do Multímetro Keysight 34461A e Microfone Brüel & Kjær 4180 calibrados em Laboratórios Acreditados.

RESULTADO **Aprovado** O Equipamento CUMPRE os requisitos da Norma IEC 61672-3 e legislação aplicável.

Nota Ao abrigo da Portaria n.º 370/2023, que aprova o Regulamento do Controlo Metrológico Legal dos Sonómetros, a operação associada a este Certificado de Verificação, no caso de aprovação, é válida por 12 Meses, após a data da sua realização.

Assinatura válida
Digitally signed by Trescal Portugal, Lda
Date: 2025.06.25 15:57:22 +01:00
Reason: Documento aprovado electronicamente

Executado Por

Hugo Duarte

O Responsável Técnico

Hugo Duarte

O presente Certificado de Verificação só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s).

Trescal Portugal

Site I: Parque Oriente, Av. D. Nuno Álvares Pereira, 4A, BL7 2695-167 - Bobadela Telf: +351 219 585 378

Site III: Rua Central da Gandra, nº 1512, R/C, 4585-116 Gandra Telf: +351 224 229 449

Email: info.portugal@trescal.com website: www.trescal.pt

Trescal

Certificado de Calibração Nº CL-42702RD-25
Calibration Certificate

Equipamento *Equipment*	Sonómetro	
Fabricante *Manufacturer*	01dB	**Data de Execução** 2025-06-25
Modelo *Model*	Solo	**Data de Emissão** 2025-06-25
Nº Série *Serial Number*	61277	
Código Interno *Internal Code*	-------	

Cliente *Client* Sonometria, Medições de Som, Projecto Acústico, Consultoria, Higiene e Segurança Lda

Morada *Address* Rua da Mina, Nº 21
2710-404 - Sintra 2730-157 Sintra

Condições Ambientais *Environmental Conditions*
Temperatura T = 23.2 ± 3°C *Temperature*
Humidade Relativa H.R. = 54.3 ± 20 %hr *Relative Humidity*
Pressão Atmosférica P.A. = 101.7 ± 3 kPa *Atmospheric Pressure*

Local de Calibração Nas instalações do Laboratório - Site I
Calibration Location

Procedimento *Procedure* PC 2501, Edição A, Revisão 0
IEC 61672-3:2013

Rastreabilidade *Traceability* Os resultados apresentados estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).
The presented results are traced to national or international standards that carry out the units of measurement according to the International System of Units (SI).

Incerteza *Uncertainty* A incerteza de medição expandida apresentada, está expressa pela incerteza de medição padrão, multiplicada por um fator de expansão "k" que corresponde a uma probabilidade de cobertura de aproximadamente 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o Doc. EA-4/02.
The expanded measurement uncertainty shown is expressed by the standard measurement uncertainty, multiplied by an expansion factor "k" which corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The uncertainty was calculated in accordance with Doc. EA-4/02.

Assinatura válida
Digitally signed by Tr al Portugal, Lda
Date: 2025.06.2 10 :56 +01:00
Reason: Docume aprovado electronicamente

Executado Por
José Loja

O Responsável Técnico
Hugo Duarte

Os resultados apresentados referem-se apenas aos itens calibrados. Não pode ser reproduzido parcialmente
The results presented refer only to the calibrated items. Cannot be partially reproduced

Trescal Portugal
Site I: Parque Oriente, Av. D. Nuno Álvares Pereira, 4A, B7, 2695-167 Bobadela Telf: +351 219 585 378
Site III: Rua Central da Gandra, nº 1512, R/C, 4585-116 Gandra Telf: +351 224 229 449
Email: info.portugal@trescal.com Website: www.trescal.pt

Trescal

Despacho de Qualificação IPQ Nº 541/2023

Etiqueta Nº: 2025-001-392498-5

Certificado de Verificação

Número 245.71-00805

Ref.ª do Serviço VP-75898ML-25

ENTIDADE

NOME Sonometria, Medições de Som, Projecto Acústico, Consultoria, Higiene e Segurança Lda

ENDEREÇO Rua da Mina nº 21

2710-157 - Sintra

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Sonómetro com integrador

CONSTITUIÇÃO	SONÓMETRO	MICROFONE	PRÉ-AMPLIFICADOR	CALIBRADOR
MARCA	01dB	01dB	01dB	RION
MODELO	Solo	MCE 212	PRE 21 S	NC-74
NÚMERO SÉRIE	61198	91509	14343	34883961

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO 1

RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR 0,1 dB

DESPACHO DE APROVAÇÃO DE MODELO 245.70.04.3.55

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Verificação Periódica

DATA 13/10/2025

MÉTODO Comparação

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA Portaria nº 370/2023 de 15 de novembro e Proc. EIA PV 2501, Edição A, Revisão 00.

RASTREABILIDADE METROLÓGICA Às unidades SI, através do Multímetro Keysight 34461A e Microfone Brüel & Kjær 4180 calibrados em Laboratórios Acreditados.

RESULTADO **Aprovado** O Equipamento CUMPRE os requisitos da Norma IEC 61672-3:2013 e legislação aplicável.

Nota Ao abrigo da Portaria n.º 370/2023, que aprova o Regulamento do Controlo Metrológico Legal dos Sonómetros, a operação associada a este Certificado de Verificação, no caso de aprovação, é válida por 12 Meses, após a data da sua realização.

Assinatura válida
Digitally signed by Trescal Portugal, Lda
Date: 2025.10.16 08:02:33 +01:00
Reason: Documento aprovado electronicamente

Executado Por

Hugo Duarte

O Responsável Técnico

Hugo Duarte

O presente Certificado de Verificação só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s).

Trescal Portugal Site I: Parque Oriente, Av. D. Nuno Álvares Pereira, 4A, BL7 2695-167 - Bobadela Telf: +351 219 585 378

Site III: Rua Central da Gandra, nº 1512, R/C, 4585-116 Gandra Telf: +351 224 229 449

Email: info.portugal@trescal.com website: www.trescal.pt

Trescal

IPAC acreditação ilac-MRA

Certificado de Calibração Nº CL-64108RD-24
Calibration Certificate

Equipamento *Equipment*	Sonómetro
Fabricante *Manufacturer*	01dB
Modelo *Model*	Solo
Nº Série *Serial Number*	61198
Código Interno *Internal Code*	-------

Data de Execução
2024-09-10

Data de Emissão
2024-09-13

Cliente *Client* Sonometria, Medições de Som, Projeto Acústico, Consultoria

Morada *Address* Rua da Mina, Nº 21, Barrunchal
2710-404 - Sintra

Condições Ambientais *Environmental Conditions*
Temperatura T = 23.2 ± 3°C *Temperature*
Humidade Relativa H.R. = 54.3 ± 20 %hr *Relative Humidity*
Pressão Atmosférica P.A. = 101.7 ± 3 kPa *Atmospheric Pressure*

Local de Calibração Nas instalações do Laboratório - Site I
Calibration Location

Procedimento *Procedure* PC 2501, Edição A, Revisão 0
IEC 61672-3:2013

Rastreabilidade *Traceability* Os resultados apresentados estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).
The presented results are traced to national or international standards that carry out the units of measurement according to the International System of Units (SI).

Incerteza *Uncertainty* A incerteza de medição expandida apresentada, está expressa pela incerteza de medição padrão, multiplicada por um fator de expansão "k" que corresponde a uma probabilidade de cobertura de aproximadamente 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o Doc. EA-4/02.
The expanded measurement uncertainty shown is expressed by the standard measurement uncertainty, multiplied by an expansion factor "k" which corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The uncertainty was calculated in accordance with Doc. EA-4/02.

Assinatura válida
Digitally signed by Tr al Portugal, Lda
Date: 2024.09.1 17 0:35 +01:00
Reason: Docume aprovado electronicamente

Executado Por
Hugo Duarte

O Responsável Técnico
Manuel Bernardo

Os resultados apresentados referem-se apenas aos itens calibrados. Não pode ser reproduzido parcialmente
The results presented refer only to the calibrated items. Cannot be partially reproduced

Trescal Portugal
Site I: Rua 1º de Dezembro, nº 2, 2695-727 São João da Talha — Telf: +351 219 585 378
Site II: Rua do Ouro, Lote 13, 2950-007 Palmela — Telf: +351 212 389 409
Site III: Rua Central da Gandra, nº 1512, R/C, 4585-116 Gandra — Telf: +351 224 229 449
Email: info.portugal@trescal.com — Website: www.eialab.com

Anexo 1.16 – Publicação Referências no desenvolvimento do estudo "Avaliação da Correlação entre o Deslocamentos Altimétricos Obtidos pelo InSAR e Dados Piezométricos do SNIRH"

Chin. Geogra. Sci. 2013 Vol. 23 No. 2 pp. 237–248
doi: 10.1007/s11769-013-0589-6

Springer Science Press
www.springerlink.com/content/1002-0063

Comprehensive Analysis and Artificial Intelligent Simulation of Land Subsidence of Beijing, China

ZHU Lin[1, 2], GONG Huili[1, 2], LI Xiaojuan[1, 2], LI Yongyong[1, 2], SU Xiaosi[3], GUO Gaoxuan[4]

(1. *College of Resources Environment and Tourism*, *Capital Normal University*, *Beijing* 100048, *China*; 2. *Laboratory Cultivation Base of Environment Process and Digital Simulation*, *Beijing* 100048, *China*; 3. *College of Environment and Resources*, *Jilin University*, *Changchun* 130012, *China*; 4. *China Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing*, *Beijing* 100958, *China*)

Abstract: Mechanism and modeling of the land subsidence are complex because of the complicate geological background in Beijing, China. This paper analyzed the spatial relationship between land subsidence and three factors, including the change of groundwater level, the thickness of compressible sediments and the building area by using remote sensing and GIS tools in the upper-middle part of alluvial-proluvial plain fan of the Chaobai River in Beijing. Based on the spatial analysis of the land subsidence and three factors, there exist significant non-linear relationship between the vertical displacement and three factors. The Back Propagation Neural Network (BPN) model combined with Genetic Algorithm (GA) was used to simulate regional distribution of the land subsidence. Results showed that at field scale, the groundwater level and land subsidence showed a significant linear relationship. However, at regional scale, the spatial distribution of groundwater depletion funnel did not overlap with the land subsidence funnel. As to the factor of compressible strata, the places with the biggest compressible strata thickness did not have the largest vertical displacement. The distributions of building area and land subsidence have no obvious spatial relationships. The BPN-GA model simulation results illustrated that the accuracy of the trained model during fifty years is acceptable with an error of 51% of verification data less than 20 mm and the average of the absolute error about 32 mm. The BPN model could be utilized to simulate the general distribution of land subsidence in the study area. Overall, this work contributes to better understand the complex relationship between the land subsidence and three influencing factors. And the distribution of the land subsidence can be simulated by the trained BPN-GA model with the limited available dada and acceptable accuracy.

Keywords: land subsidence; groundwater level change; compressible sediments thickness; building area; Back Propagation Neural Network and Genetic Algorithm (BPN-GA) model

Citation: Zhu Lin, Gong Huili, Li Xiaojuan, Li Yongyong, Su Xiaosi, Guo Gaoxuan, 2013. Comprehensive analysis and artificial intelligent simulation of land subsidence of Beijing, China. *Chinese Geographical Science*, 23(2): 237–248. doi: 10.1007/s11769-013-0589-6

1 Introduction

Land subsidence is the lowering of the land-surface elevation that takes place underground. The stress, undergone by pore water saturation of the aquitard and aquifer, is transferred to the skeleton of porous media, resulting in the deformation. Common causes of land subsidence from human activity are water, oil, and gas pumping from underground. Generally, long-term and large-scale over-exploitation of groundwater was the main cause for inducing land subsidence. Major subsidence areas are along coastal areas in the world, such as Tokyo in Japan, Anaheim in the USA and Shanghai in China. Attention has been drawn to inland areas, which is the focus of the eighth international symposium on land subsidence (EISOLS). Many studies focused on the models of land

Received date: 2012-04-18; accepted date: 2012-09-10
Foundation item: Under the auspices of National Natural Science Foundation of China (No. 41201420, 41130744), Beijing Nova Program (No. Z111106054511097), Foundation of Beijing Municipal Commission of Education (No. KM201110028016)
Corresponding author: GONG Huili. E-mail: gonghl@263.net
© Science Press, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

subsidence (Burbey, 2006; Leake and Galloway, 2010; Ye *et al*., 2010; Yu *et al*., 2010; Calderhead *et al*., 2011), measuring and monitoring technologies of ground displacements (Galloway and Hoffmann, 2007; Gong *et al*., 2008; Strozzi *et al*., 2010; Tomas *et al.*, 2011), and land subsidence management (Barends, 2010). The groundwater model and soil mechanics model are the bases of land subsidence management and control. Leake and Galloway (2007) developed the Subsidence and Aquifer-System Compaction Package (SUB-WT) model for Modular Three-dimensional Finite-difference Groundwater Flow Model (MODFLOW), professional software for simulating groundwater flow and aquifer system compaction. The SUB-WT allows geostatic stress to vary as a function of the position of the water table (Leake and Galloway, 2010). In China, some scientists focused on the complicated deformation of sedimentary layers, for example, Shi *et al.* (2008) and Ye *et al.* (2010) studied the elastic, visco-elastic, and elastic-plastic and visco-elastic-plastic deformation. More observation data and field data are needed to build a numerical model of land subsidence.

Beijing is China′s political and cultural center, with an area of plain more than 6390 km^2. The population reached 1.58×10^7 in 2006. In Beijing, land subsidence has been one of the geological disasters since the 1960s. In 1999, area of land subsidence with accumulated ground subsidence over 100 mm was 1800 km^2, and that over 200 mm was about 350 km^2. Because of the declining precipitation and increasing demand of water supply, five water sources for emergency purposes have been built since 2001. Groundwater supplied two-thirds of the total water requirement of Beijing Municipality. Over-drafting of aquifers is the major cause of subsidence in Beijing. With groundwater pumping increase, land subsidence becomes much more serious, and five bigger land subsidence regions formed. The biggest accumulative ground subsidence had reached to 1163 mm in 2009 (Yang *et al*., 2010). Land subsidence had caused many problems, such as the damages of under-ground pipelines, traffic lines and building, and the related environmental-induced geological disasters such as ground fissure. Consequently, to improve the accuracy of the analysis and assessment of aquifer-system compaction, land subsidence has been studied for many years.

In Beijing, land subsidence studies were focused on monitoring (Liu *et al*., 2007; Gong *et al*., 2008; Zhang *et al*., 2009), mechanism (Jia *et al*., 2007; Zhu *et al*., 2009; Tian *et al*., 2012) and numerical simulation modeling (Cui *et al*., 2003; Gong, 2009). A numerical model of land subsidence constructed with MODFLOW software is good for researchers to understand the relationship between groundwater over-exploitation and the deformation of aquitard and aquifer systems and to make a prediction of the distribution of land subsidence. But simulation results from these types of models only reflected the general tendency of land subsidence (Cui *et al*., 2003; Gong, 2009). These numerical models of land subsidence include water flow modeling and soil mechanics modeling. To build the numerical models long-time continuous observation data and field data are needed. The sparse available data constrained the accuracy of the numerical model. At the same time, because of the complexity of land subsidence process, the statistical method is not fit for simulating the land subsidence.

Back Propagation Neural Network (BPN) model is nonlinear and has been the most popular form of artificial neural networks. But there are some defects, such as getting the local minimum value not the global value and the slow convergence rate. Genetic algorithms (GA) can resolve these defects of BPN. GA are computational optimization search methods based on several features of biological evolution such as gene structure, and chromosomes (Moghadassi *et al*., 2010), which are good at exploring a large and complex space in an intelligent way to find values close to the global optimum (Montana and Davis, 1989). Some studies have been carried out to use GA to train the feed-forward networks (Montana and Davis, 1989; Altun and Allahverdi, 2007; Fiszelew *et al*., 2007; Venkatesan *et al*., 2009; Moghadassi *et al*., 2010; Karegowda *et al*., 2011; Li *et al*., 2011). In the field of the land subsidence, BPN model has been successfully used to simulate the land subsidence in some coastal cities (Li *et al*., 2005; Li *et al*., 2008). Li *et al*. (2009) combined BPN with GA to simulate land subsidence and the model had one input layer, which is the variation of groundwater level.

The purpose of this investigation is to learn the mechanism of land subsidence in Beijing and to give an effective method to simulate and forecast land subsidence with easy-obtained data and acceptable accuracy. The quantitatively spatial relationships between land subsidence and the three factors, i.e. groundwater level change of the pumped aquifer system, the compressible

strata thickness and the building area were analyzed. The building area is used to reflect the static loading. A nonlinear artificial neural network, BPN model combined with GA (hereinafter called BPN-GA), was constructed and trained to simulate the land subsidence according to the nonlinear relationship between land subsidence and the three factors. The results could contribute to supporting resource management and hazard mitigation measures.

2 Materials and Method

2.1 Study area

The study area (40°00′–40°30′N, 116°25′–117°00′E) is located at the up-middle part of alluvial-proluvial plain fan of the Chaobai River in Beijing, covering an area of about 1352 km^2 (Fig. 1). It mainly includes plain region of Huairou District, Miyun County and Shunyi District. The study area belongs to the semi-arid and semi-humid monsoon climate zone. The mean annual precipitation from 1959 to 2010 is 615.4 mm. About 80% of the precipitation fell between June and September. From 2000 to 2010, the mean annual precipitation is only 517.1 mm. In 1999, precipitation was about 300 mm. The average temperature is about 11.8℃. In Huairou, Emergency Groundwater Resources Region with an area of about 25 km^2 was built in August 2003, located in the region near Yanxi River and Huai River. There are 21 groups of groundwater-pumping wells for emergency. One group includes two groundwater pumping wells with different depth. These groundwater pumping wells worked as not for emergency, but for daily water supply wells because of the large demand of water resources in Beijing. In the study area, many groundwater-pumping wells belonging to water supply factory were set up along the Chaobai River. There are two land subsidence monitoring stations with borehole extensometer. One is in Tianzhu Town and the other is in Renhe Town both in Shunyi District. Quaternary strata are made up of the pore media and are main water-containing strata. The thickness of quaternary strata is generally thicker in the southern area and western area than those in the northern and eastern areas. There are three aquifer systems (Jia *et al*., 2007). The first one includes unconfined aquifer (Q_4) and shallow confined aquifer (Q_3) with the depth of aquifer bottom less than 100 m. The second one is deep confined aquifer (Q_2) with the depth of aquifer bottom of about 300 m. The third one is deeper confined aquifer

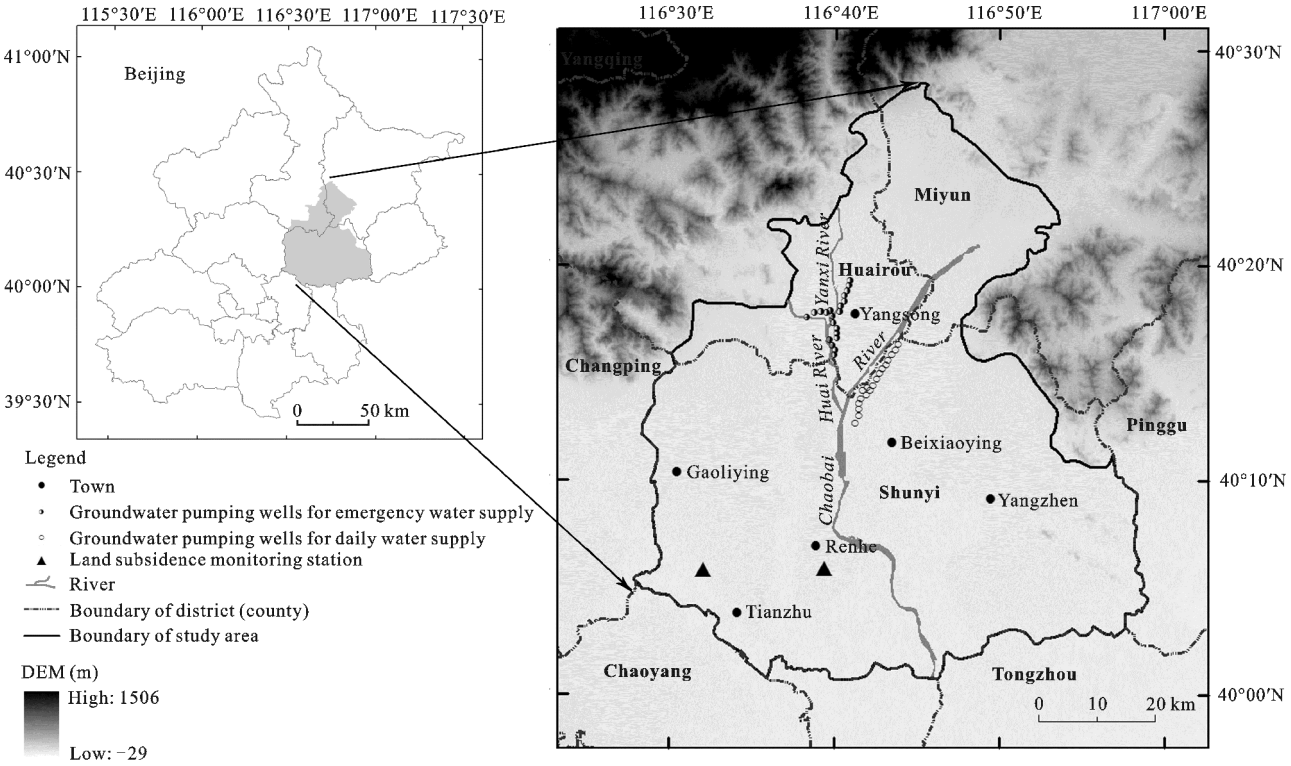


Fig. 1 Location of study area

(Q_1) with the depth of aquifer top of over 300 m. The first aquifer system is mainly for agriculture exploitation. The second confined aquifer system is the main strata for groundwater resource exploitation. The groundwater recharge sources include precipitation, surface water body and irrigation water. Precipitation is main source of groundwater recharge. Exploitation is the main way for groundwater discharge.

2.2 Spatial dataset

To make a quantitative comparison between the cumulative land subsidence and human activity factors, land satellite (Landsat) images were collected to obtain changes in building areas in 1976, 1990, 2000, 2006 in the study area. The image obtained in 1976 was collected by the multispectral scanner (MSS) with a spatial resolution of 79 m. Other images were obtained with thematic mapper or enhanced thematic mapper plus (TM/ETM+) with a spatial resolution of 30 m. The maximum likelihood method of supervised classification was used to extract the building area. To improve the accuracy of the classification, manual interpretation was used to modify the building area with the overall classification accuracy of about 90%.

To quantitatively analyze the relation between land subsidence and three factors, and to build the land subsidence simulation model, land subsidence, groundwater level and strata data were collected. The cumulative land subsidence contour from the period of 1955 to 2005, groundwater level contours in 1965 and in 2005, and the isopach of compressible sediments were obtained. The compressible sediments were made up of fine-grained sediments such as clayey silt in the study area. These contours and isopach were discretized with the cell size of 500 m × 500 m in ArcGIS software.

2.3 BPN-GA model

Neural networks are algorithms for optimizing and learning based on concepts inspired by research into the nature of the brain (Montana and Davis, 1989). It is composed of a large number of highly interconnected processing elements (neurons) working in unison to solve specific problems (Karegowda *et al*., 2011). During the BPN training process, the error, caused by the difference between the desired output vector and the output layer′s response to an input vector, propagates back through connections between layers and adjusts appropriate connection weights for minimizing the error (Bhise and Pratihar, 2006). It is difficult for BPN model to be used to interpret the relationships between the output layer and the input layers on the basis of the learned weights. Traditional BPN model can asymptotically approach the ideal function and simulate complicated nonlinear system.

In this paper, BPN-GA model was used to simulate the vertical displacement from 1955 to 2005. This BPN model includes three input layers, one hidden layer and one output layer (Fig. 2). The GA was used to optimize the initial weights and thresholds of BPN model, which can contribute to achieving the global optimal parameters rather than the local optimal values. The flow chart of constructing model is shown in Fig. 3. As long as the objective function met the convergence criteria of the minimum mean square deviation or the iteration number

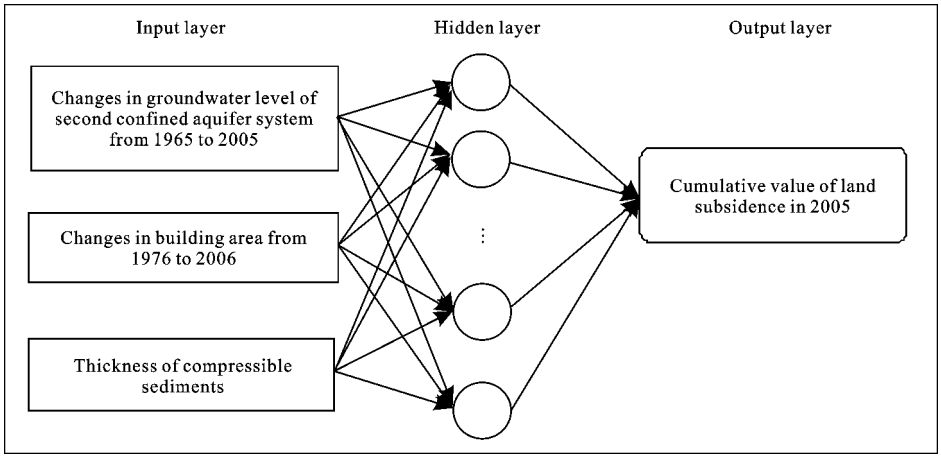


Fig. 2 Structure of Back Propagation Neural Network (BPN) model

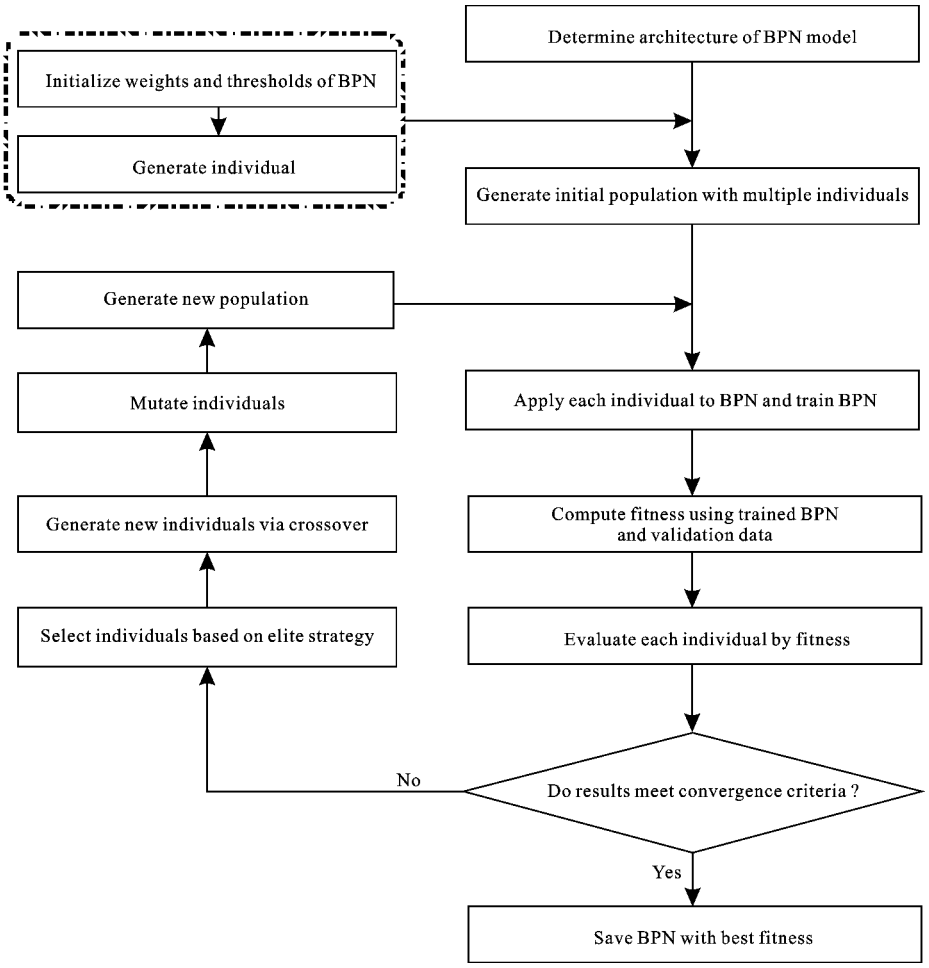


Fig. 3 Flowchart of Back Propagation Neural Network and Genetic Algorithm (BPN-GA) model

of over 100, the BPN model training was terminated.

The weights and thresholds of BPN model were determined by the GA. First, random values were assigned to the population of individuals with initial threshold and weights, which were used to train the BPN model; and the size of the initial population was set as 20. The individuals in the genetic space are called chromosomes. To evaluate the individual′s simulation ability of the BPN model, a fitness value was calculated. The simulation accuracy of the trained BPN model increased with the fitness value. The calculation equation of the fitness value (f) is expressed as Equation (1):

$$f = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \mathrm{abs}(O_i - P_i)} \tag{1}$$

where O_i is the value of land subsidence (mm) at the ith sampling grid with the total discretized grid number of n; P_i is the simulated value with trained BPN model. Second, based on the obtained fitness values, selection, crossover and mutation of the evolution steps of GA were implemented to get the most optimal weights and thresholds, which are treated as the final network weights and thresholds. By using this selection process, the high fitness chromosomes were used to eliminate low fitness chromosomes. The crossover and mutation operations were used to produce new ′fitter′ individuals into the population.

3 Results and Discussion

3.1 Relationships between land subsidence and three factors

3.1.1 Effect of groundwater level on land subsidence

In the Huairou Emergency Water Resources region, groundwater level of the shallow confined aquifer system (Q_3) changed significantly since the exploration of the emergency water resources (Fig. 4). The groundwa-

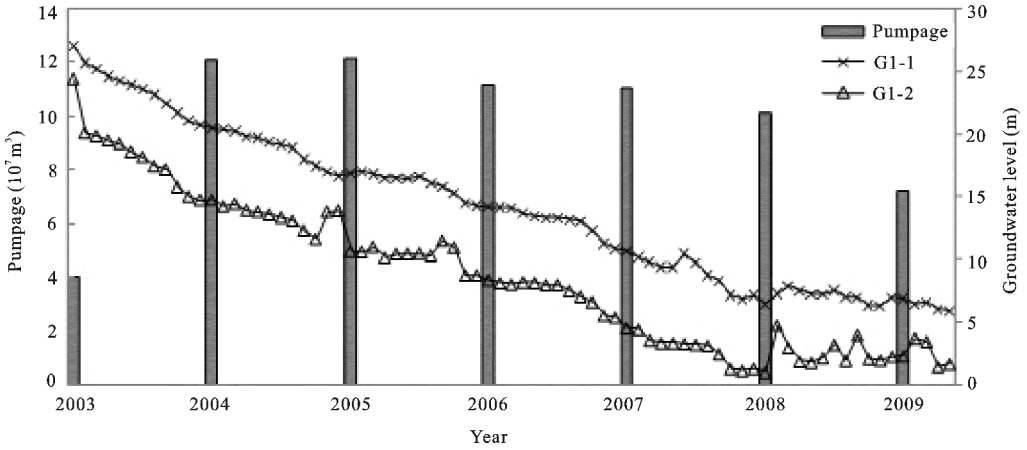


Fig. 4 Dynamic changes of groundwater pumpage and groundwater levels in Huairou Emergency Water Resource region, Beijing (G1-1 and G1-2 are numbers of observation well monitoring groundwater level of stratum with depth of 30 m and 39 m, respectively)

ter level monitoring data showed that the groundwater level declined 7.3 m from August 2003 to the end of 2004, the early stage of the emergency water resource. The groundwater level decreased gradually about 9 m from 2005 to 2007. From 2008 to 2009, with the decrease in groundwater exploitation, the groundwater level declining ratio was down to approximately 0.16 m per month except for July which is a rainy month of the increase in precipitation and surface inflow.

Vertical borehole extensometers are used to measure the continuous change in vertical distance in the interval between the land surface and a reference point at the bottom of a deep borehole (Galloway and Burbey, 2011). Borehole extensometer in Tianzhu Town of Shunyi District with the depth of 308.1 m was established in 2004. The subsidence data monitored by borehole extensometer shows the mean annual groundwater level of aquifers declining from 2005 to 2010. The groundwater levels of strata with different depth showed declining tendency. The values of land subsidence in different strata and depths showed big difference because of the lithology and thickness. Figure 5 shows that the accumulative value of land subsidence increased with the declining groundwater level of the confined aquifer with the depth between 210 m and 218 m. The correlation coefficient between land subsidence and groundwater level reaches to 0.98. Since the borehole extensometer in Tianzhu Town was constructed in April 2004, the start value was set as zero.

In 1965, the groundwater flow field was in natural condition. With the over-exploitation of ground water, there was a great change of flow field of the second confined aquifer system from 1965 to 2005. The area of groundwater funnel and the depth of funnel center in-

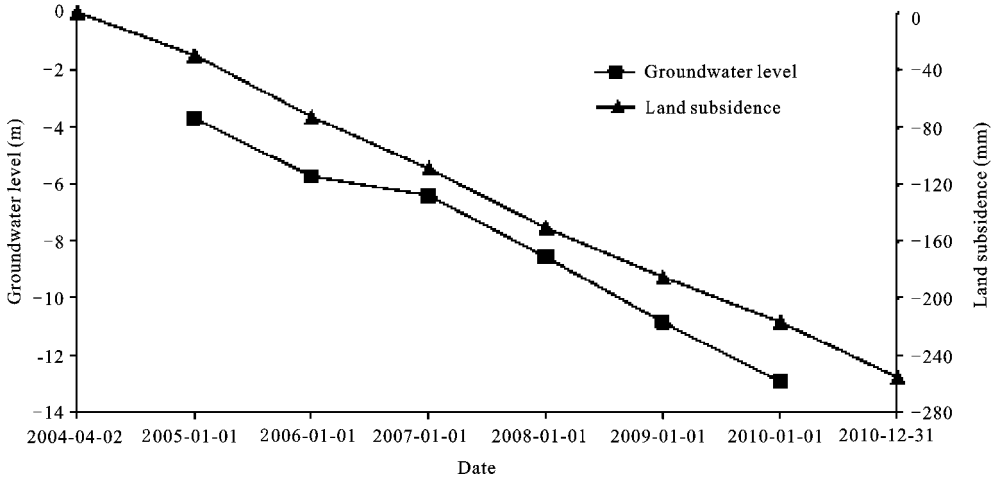


Fig. 5 Groundwater level and land subsidence observed with borehole extensometer in Tianzhu Town of Shunyi District, Beijing

creased continuously. In 1965, the lowest groundwater level was about 20 m above sea level, located in the middle part of alluvial-proluvial plain fan of the Chaobai River. In 2005, the lowest groundwater level was over 10 m below sea level in the western region of Shunyi District in Beijing. To analyze the difference of the groundwater level from 1965 to 2005, the groundwater level in 1965 was subtracted by the level in 2005 by using ArcGIS tools. There were two big groundwater funnels (Fig. 6). One was near the groundwater pumping wells, located in the upper part of alluvial-proluvial plain fan of the Chaobai River, where the deformation was small because of the relatively high groundwater recharge. Another funnel in the western region of Shunyi District with the drawdown of groundwater level was about 40 m, where there were two subsidence funnels with the largest amount of the cumulative land subsidence of about 500 mm during the period from 1955 to 2005.

3.1.2 Effect of compressible sediments thickness on land subsidence

In the study area, the land subsidence is mainly from the deformation of the compressible sediments. Under the same stress situation, the deformation of the compressible sediments such as cohesive soil is much higher than that of sand and sandy pebble (Jia *et al*., 2007). The thicknesses of the compressible sediments and the quaternary strata (Q) in the southwestern region are greater than those in the northeastern region of the study area (Fig. 7). In the western part of Shunyi District, the thicknesses of quaternary and compressible sediments are generally over 400 m and 150 m, respectively. The largest values of the thicknesses reach up to 700 m and 220 m, respectively. In the same region, there are two subsidence funnels. The deformation at the spot of the largest compressible sediments thickness is about 400 mm, which is not the maximum value of the deformation. In the whole study area, the regions of the maxi-

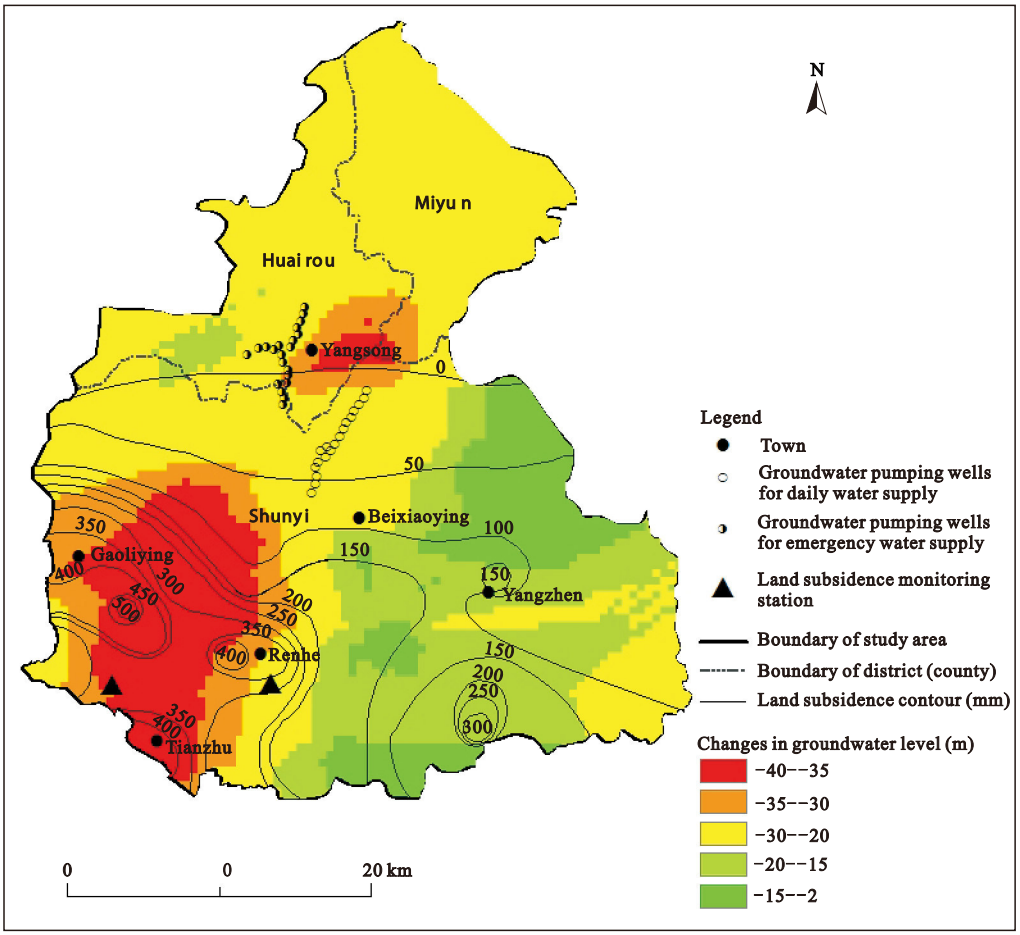


Fig. 6 Land subsidence in 2005 and groundwater level fluctuation from 1965 to 2005 in study area

mum deformation and the largest thickness of the compressible sediments are partially overlapped. From the northern region to the southern region, the value of the land subsidence becomes bigger with the increasing thickness of the compressible sediments. In the northern region, the upper part of alluvial-proluvial plain fan of the Chaobai River, there is no surface deformation. The reason is that there are no compressible sediments in this region (Fig. 7). In the southern region, there is no obvious variation of thickness of the compressible sediments. The distributions of the land subsidence and the compressible sediments show spatial variability.

3.1.3 Effect of building area on land subsidence

Urbanization has greatly increased the urban area. In 1976, the building area was only about 14.28 km^2 and the patch number was ten in the study area (Fig. 8). With the urbanization and increasing population, the building area and the patch number in 1990 had reached up to 162.71 km^2 and 362, respectively. From 1990 to 2006, the increasing ratio of building area was about 6.58 km^2 per year. Generally, the building area was mainly distributed near the district (county) center and the public transport networks. Increasing building area changed the total stress acting on the geological solid. This stress may affect the land subsidence rate. In the southwestern of Shunyi District such as Tianzhu Town, the building area is bigger, and land subsidence is relatively more serious. But the effect of increase in building area on land subsidence is not significant. The possible reason may be the building height and building density not concerned.

3.1.4 Relationships of land subsidence to three factors

The discretized data show that the relationship between the land subsidence and groundwater level change, compressible sediments thickness and the building area are nonlinear. On the whole, the correlation coefficients between land subsidence and three factors are 0.46, 0.64 and 0.25, respectively. In the region with deformation over 50 mm, the correlation coefficients of land subsi-

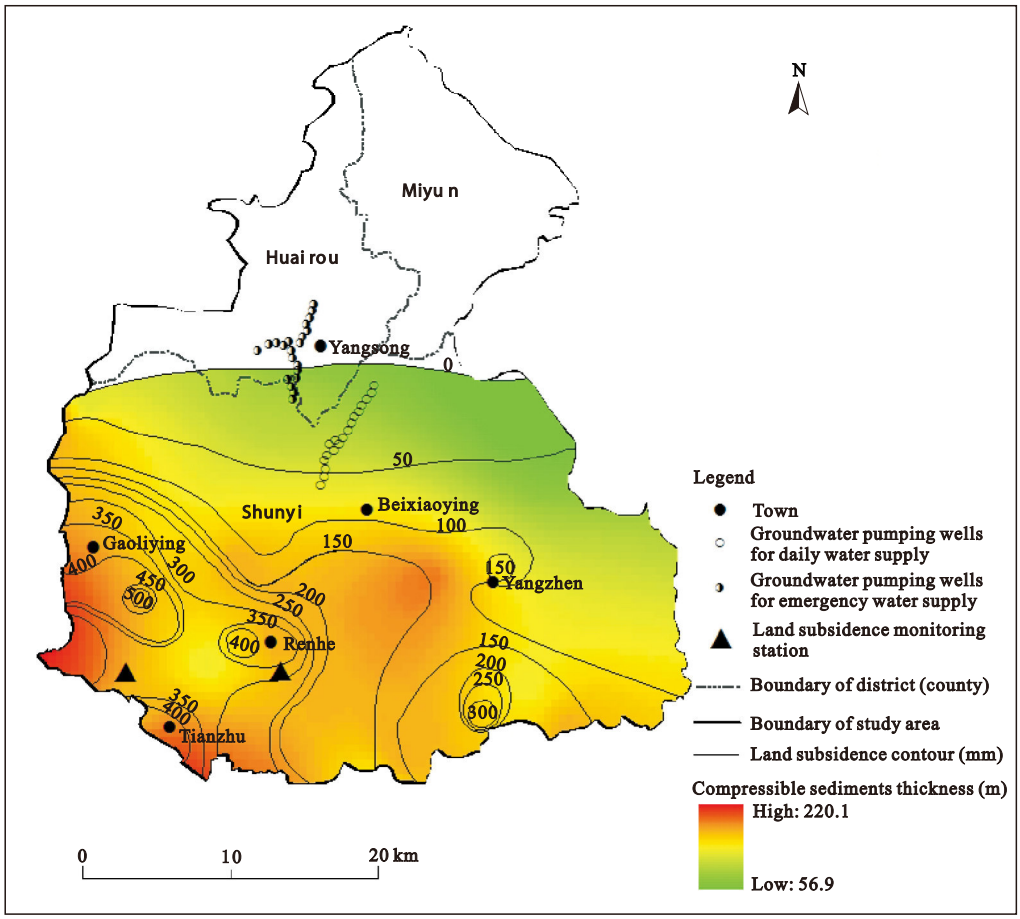


Fig. 7 Land subsidence in 2005 and compressible sediments thickness in study area

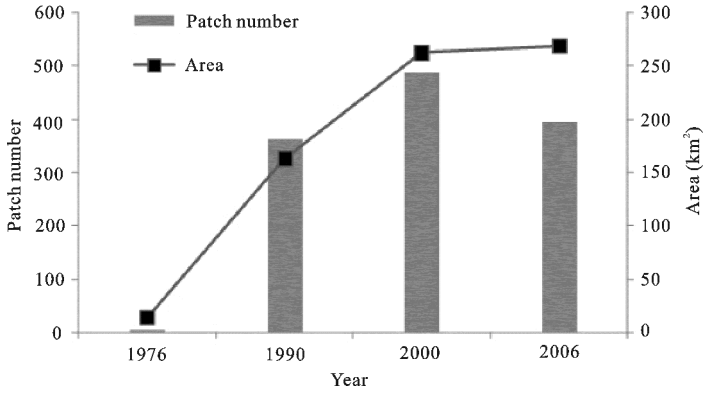


Fig. 8 Building area and patch number from 1976 to 2008 in study area

dence to groundwater change, compressible sediments thickness and building area are 0.63, 0.59 and 0.33, respectively. In the southeastern region of Shunyi District, where the groundwater level change is generally less than 20 m, the correlation of land subsidence to building area is little. That is, the effect of static loading to the land subsidence shows less spatial difference. While the thickness of compressible sediments greatly controls the land subsidence, the correlation coefficient reaches 0.78. In the northwestern region of Shunyi District generally, where the groundwater level change is over 20 m, there are groundwater level funnel and land subsidence funnels.

3.2 Trained BPN-GA model

In the study area, even if the logarithm transformation of land subsidence was adopted, the nonlinear relation between land subsidence and the three factors still remain. The BPN-GA model, including three input layers, one hidden layer including seven neurons, and one output layer with one neuron, was constructed. The hidden layer adopts the hyperbolic tangent sigmoid transfer function, and the output layer adopts linear transfer function. Some parameters of the trained BPN-GA model are showed in Table 1.

This study selected the region with land subsidence over 50 mm as the modeling area. The weights and thresholds of the BPN model are determined by the GA. These weights and thresholds have nothing to do with the effect of the three factors on the occurrence of the land subsidence. About 75% of the discretized data are used to train the improved BPN model. The other 25% of the discretized data are used as verification data to test the accuracy of BPN model.

3.3 Model validation

The comparison of the simulated cumulative value of land subsidence in 2005 with the 25% of the discretized data showed that the average absolute error between the simulated value by using BPN-GA model and the verification data was about 32 mm. During 50 years, 51% of the verification data had an absolute error of less than 20 mm. About 5% of the verification data had an absolute error of more than 100 mm. The average relative error of simulation is about 21.4%. In this study, the larger error points between the simulated value and the verification data were generally distributed in the area of land subsidence or the area with three factors having

Table 1 Parameters of Back Propagation Neural Network (BPN) model and Genetic Algorithm (GA)

BPN model		Genetic Algorithm	
Number of input nodes (I)	3	Population size	30
Number of hidden nodes (H)	7	Individual size	36
Number of output nodes (O)	1	Maximum generations	100
Training function	Trainlm	Probability of crossover	0.7
Learning rate	0.01	Probability of mutation	0.7
Number of epochs	100	Evolution goal	30

Notes: Individual size = (I × H) + H + (H × O) + O; Trainlm is training function adopting Levenberg-Marquardt algorithm

abrupt gradient change. The main reason is that BPN-GA model simulated the main pattern of the land subsidence in the study area. This pattern is extracted from the discretized training data. The output layer, the distribution of land subsidence, has significant spatial heterogeneity. These uniformly distributed training data caused the number of points with the land subsidence value of abrupt change less than that of the land subsidence value of spatially slow change. The training aim of the BPN- GA model is to make the error between the simulated value and the actual value having the minimum variance. The pattern of the most training data was learned by the BPN model, which make the features of the small number of the training data un-reflected.

To assess the BPN-GA model, the simulated output of the trained BPN-GA model was compared with the existed studies. Cui *et al*. (2003) used the Interbed Storage package (IBS) package in MODFLOW to simulate the land subsidence from 1995 to 1997 in the part area of Beijing. Only one monitoring point with three years data was used to test the accuracy of the model, which could not reflect the regional situation. The relative error was less than 15%. Gong (2009) employed the SUB package in MODFLOW to simulate the land subsidence from 2000 to 2007 in Huairou Emergency Water Resource Region. The monitoring data of extensometer in Tianzhu Town showed that the simulated results of the numerical model only revealed the general tendency of the land subsidence from 2004 to 2007. About 56% of the time slice of the land subsidence showed the error is more than 50 mm. The largest error is about 60 mm. Overall, the accuracy of the trained BPN-GA model compared with the existing numerical model is improved.

What′s more, based on the discretized training data, the multi-variable function between the vertical displacement and the three factors was constructed. The formula, which is significant at 0.05 level, is shown as follows.

$$Y = -217.69 + 1.63 \times X_1 + 1.77 \times X_2 + 5.15 \times X_3 \qquad (2)$$

where Y is the vertical displacement; X_1, X_2 and X_3 are the building area (10^4 m^2), groundwater level change value and compressible sediments thickness, respectively. The result by using the multi-variable function showed the average absolute error between the simulated value and the verification data was about 54 mm. And 27% of the verification data had an absolute error of less than 20 mm. About 16% of the verification data had an absolute error of more than 100 mm. This result shows that the accuracy of BPN-GA model is better than the multi-variable function for simulating the regional land subsidence.

4 Conclusions

Based on the analyses of the land subsidence and three factors, there is one big groundwater funnel and a small deformation because of the relatively high groundwater recharge and no compressible sediments in the upper part of the study area. In the western region of Shunyi District, Beijing, there is one groundwater funnel and two subsidence funnels, where the compressible sediments thickness has the largest values. The deformation at the spot of the largest compressible sediments thickness is not the maximum value of the deformation. And the regions of the land subsidence funnel and the groundwater funnel center do not overlap completely. The distributions of building area and land subsidence have no obvious spatial relationships.

In the region with deformation over 50 mm, there are the non-linear correlations of land subsidence to three factors. The change of the groundwater level is the most significant influencing factor. The compressible sediments as the media of the occurrence of land subsidence greatly affect the accumulative value of the land subsidence. Serious land subsidence is generally distributed in the region with the thick compressible sediments. The city expansion means the static loading increasing which enlarges the total stress acting on the geological solid and may speed up the land subsidence. But the effect of the increasing building area to the land subsidence is not obvious.

In the study area, there exists a nonlinear relation between land subsidence and the three factors. The trained BPN-GA model can generally simulate the spatial pattern of land subsidence by using the value of the groundwater level change, the compressible sediments thickness and the building area. The trained model can be used by researchers for studying the distribution of land subsidence without exploring the land subsidence mechanism.

Acknowledgements

Authors would like to thank Emmanuel Xevi and Sue Cuddy at Land and Water Laboratory, Commonwealth

Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) who provide the language help. We express appreciation to Zhao Lijuan at the Laboratory Cultivation Base of Environment Process and Digital Simulation, Capital Normal University for providing the draft materials.

References

Altun A A, Allahverdi N, 2007. Neural network based recognition by using genetic algorithm for feature selection of enhanced fingerprints. In: Beliczynski B (eds.). *Adaptive and Natural Computing Algorithms*. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 467–476.

Barends F B J, 2010. Review of subsidence management in the Netherlands. In: Dora C F (eds.). *Land Subsidence*, *Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. British: International Association of Hydrological Sciences Press, 385–395.

Bhise O P, Pratihar D K, 2006. Neural network-based expert system to predict the results of finite element analysis. In: Tiwari A (eds.). *Applications of Soft Computing*. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 231–240.

Burbey T J, 2006. Three-dimensional deformation and strain induced by municipal pumping, Part 2: Numerical analysis. *Journal of Hydrology*, 330(3–4): 422–434. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.035

Calderhead A I, Therrien R, Rivera A *et al*., 2011. Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34(1): 83–97. doi:10.1016/j.advwatres.2010.09.017

Cui Yali, Shao Jingli, Xie Zhenghua *et al*., 2003. Research on the ground settlement model based on MODFLOW. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (5): 19–22. (in Chinese)

Fiszelew A, Britos P, Ochoa A *et al*., 2007. Finding optimal neural network architecture using genetic algorithms. *Research in Computing Science*, 27: 15–24.

Galloway D L, Burbey T J, 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Journal of Hydrogeology*, 19(8): 1459–1486. doi: 10.1007/s10040-011-0775-5

Galloway D L, Hoffmann J, 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Journal of Hydrogeology*, 15(1): 133–154. doi: 10.1007/s10040-006-0121-5

Gong H L, Zhang Y Q, Li X J *et al*., 2008. Modeling atmospheric effects of InSAR measurements based on Meris and GPS observations. *International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 4: IV-978–IV-981. doi: 10.1109/IGARSS.2008.4779888

Gong Huili, 2009. *Study on the Mechanism and the Monitoring Technology of the Land Subsidence*. Beijing: Report of Laboratory Cultivation Base of Environment Process and Digital Simulation. (in Chinese)

Jia Sanman, Wang Haigang, Zhao Shousheng *et al*., 2007. A tentative study of the mechanism of land subsidence in Beijing. *Analysis and Study*, 2(1): 20–26. (in Chinese)

Karegowda A G, Manjunath A S, Jayaram M A, 2011. Application of genetic algorithm optimized neural network connection weights for medical diagnosis of pima Indians diabetes. *International Journal on Soft Computing*, 2(2): 15–23. doi: 10.5121/ijsc.2011.2202

Leake S A, Galloway D L, 2007. MODFLOW ground-water model—User guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction Package (SUB-WT) for water-table aquifers. In: *U.S. Geological Survey*, *Techniques and Methods*, 6–A23.

Leake S A, Galloway D L, 2010. Use of the SUB-WT package for MODFLOW to simulate aquifer system compaction in Antelope valley, California, USA. In: Dora C F (eds.). *Land Subsidence*, *Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. British: International Association of Hydrological Sciences Press, 61–67.

Li Hongxia, Zhang Jianxiong, Zhao Xinhua, 2008. A land subsidence model based on a chaos optimization algorithm and a BP neural network. *Journal of China University of Mining & Technology*, 37(3): 396–401. (in Chinese)

Li Hongxia, Zhao Xinhua, Chi Haiyan *et al*., 2009. Prediction and analysis of land subsidence based on improved BP neural network model. *Journal of Tianjin University*, 42(1): 60–64. (in Chinese)

Li Tao, Pan Yun, Lou Huajun *et al*., 2005. Application of the artificial neural network in land subsidence prediction in the urban area of Tianjin Municipality, China. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 677–681. (in Chinese)

Li Y Y, Zhu L, Zhao L J *et al*., 2011. Study on the BP-GA model and its application in water quality assessment. *Water Resource and Environmental Protection*, 4: 2781–2784. doi: 10.1109/ISWREP.2011.5893456

Liu Yu, Ye Chao, Jia Sanman, 2007. Division of water-bearing zones and compressible layers in Beijing′s land subsidence areas. *Analysis and Study*, 2(1): 10–15. (in Chinese)

Moghadassi A R, Parvizian F, Abareshi B *et al*., 2010. Optimization of regenerative cycle with open feed water heater using genetic algorithms and neural networks. *Journal of Therm Analysis and Calorimetry*, 100(3): 757–761. doi: 10.1007/s10973-010-0727-7

Montana D J, Davis L, 1989. Training feedforward neural networks using genetic algorithms. In: Morgan K (eds.). *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 762–767.

Shi X Q, Xue Y Q, Wu J C *et al*., 2008. Characteristics of regional land subsidence in Yangtze Delta, China: An example of Su-Xi-Chang area and the City of Shanghai. *Hydrogeology Journal*, 16(3): 593–607. doi: 10.1007/s10040-007-0237-2

Strozi T, Tosi L, Teatini P *et al*., 2010. Advanced monitoring techniques for mapping land displacement on the Venice coastland with satellite SAR data. In: Dora C F (eds.). *Land Subsidence*, *Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. British: International Association of Hydrological Sciences Press, 249–254.

Tian Fang, Guo Meng, Luo Yong *et al*., 2012. The deformation be

havior of soil mass in the subsidence area of Beijing. *Geology in China*, 39(1): 236–242. (in Chinese)

Tomas R, Herrera G, Cooksley G *et al*., 2011. Persistent Scatterer Interferometry subsidence data exploitation using spatial tools: The Vega Media of the Segura River Basin case study. *Journal of Hydrology*, 400(3–4): 411–428. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.01.057

VenkatsanD, Kannan K, Saravanan R, 2009. A genetic algorithm-based articial neural network model for the optimization of ma chining processes. *Neural Computing & Applications*, 18(2): 135–140. doi: 10.1007/s00521-007-0166-y

Yang Yan, Jia Sanman, Wang Haigang, 2010, The status and development of land subsidence in Beijing plain. *Shanghai Geology*, 31(4): 23–27. (in Chinese)

Ye S J, Xue Y Q, Wu J C *et al*., 2010. A regional land subsidence model embodying complex deformation characteristics. In: Dora C F (eds.). *Land Subsidence*, *Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. British: International Association of Hydrological Sciences Press, 76–81.

Yu J, Su S, Zhu L *et al*., 2010. Research on a 3-D visualized strata model virtual reality system of land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou area. In: Dora C F (eds.). *Land Subsidence*, *Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. British: International Association of Hydrological Sciences Press, 108–113.

Zhang Y Q, Gong H L, Chen B B *et al*., 2009. Seasonal displacements in upper-middle alluvial fan of Chaobai River, Beijing, China, observed by the permanent scatters technique. *Joint Urban Remote Sensing Event*, 1423–1428. doi: 10.1109/URS.2009.5137709

Zhu L, Gong H L, Jing L L *et al*., 2009. Research on evolution of land subsidence induced by nature and human activity by utilizing remote sensing technology. *Joint Urban Remote Sensing Event*, 1331–1335. doi: 10.1109/URS.2009.5137693

geosciences

MDPI

Article

Groundwater Level Change Management on Control of Land Subsidence Supported by Borehole Extensometer Compaction Measurements in the Houston-Galveston Region, Texas

Yi Liu [1,*], Jiang Li [1] and Zheng N. Fang [2]

[1] Civil Engineering Department, Morgan State University 1700 E Cold Spring Ln, Baltimore, MD 21251, USA; jiang.li@morgan.edu

[2] Civil Engineering Department, University of Texas at Arlington, 416 Yates St., Arlington, TX 76019, USA; nickfang@uta.edu

* Correspondence: yi.liu@morgan.edu; Tel.: +1-443-885-3067

Received: 30 December 2018; Accepted: 11 May 2019; Published: 15 May 2019



Abstract: As much as 3.05 m of land subsidence was observed in 1979 in the Houston-Galveston region as a result primarily of inelastic compaction of aquitards in the Chicot and Evangeline aquifers between 1937 and 1979. The preconsolidation pressure heads for aquitards within these two aquifers were continuously updated in response to lowering groundwater levels, which in turn was caused by continuously increasing groundwater withdrawal rates from 0.57 to 4.28 million m^3/day. This land subsidence occurred without any management of changes in groundwater levels. However, the management of recovering groundwater levels from 1979 to 2000 successfully decreased inelastic compaction from about 40 mm/yr in the early 1980s to zero around 2000 through decreasing groundwater withdrawal rates from 4.3 to 3.0 million m^3/day. The inelastic consolidation that had existed for about 63 years roughly from 1937 to 2000 caused a land subsidence hazard in this region. Some rebounding of the land surface was achieved from groundwater level recovering management. It is found in this paper that subsidence of 0.08 to 8.49 mm/yr owing to a pseudo-constant secondary consolidation rate emerged or tended to emerge at 13 borehole extensometer station locations while the groundwater levels in the two aquifers were being managed. It is considered to remain stable in trend since 2000. The subsidence due to the secondary consolidation is beyond the control of any groundwater level change management schemes because it is caused by geo-historical overburden pressure on the two aquifers. The compaction measurements collected from the 13 extensometers since 1971 not only successfully corroborate the need for groundwater level change management in controlling land subsidence but also yield the first empirical findings of the occurrence of secondary consolidation subsidence in the Quaternary and Tertiary aquifer systems in the Houston-Galveston region.

Keywords: borehole extensometer; groundwater withdrawal; groundwater level change management; land subsidence; consolidation; compaction

1. Introduction

Land subsidence (LS) can be a gradual settling or sudden sinking of the Earth's surface owing to subsurface movement of earth materials [1]. LS is a global problem that has geohazardous impacts on infrastructure and the environment. In the United States, 45 states with more than 44,030 km^2 have been directly affected by LS [1]. More than 80 percent of the subsidence in the nation is identified as a consequence of human impact on subsurface water [1,2]. In the early 1900s, the Houston area began to

show the first signs of human-induced LS—initially attributed to extraction of oil and gas from the subsurface alone [3], and has been subsiding due to the combined effects of groundwater withdrawal, hydrocarbon extraction, salt dome movement, and faulting [4]. By 1977, the withdrawals from the Chicot and Evangeline aquifers had resulted in groundwater level declines of 91.5 and 106.75 m below datum in the two aquifers, respectively, in southern and eastern Harris County. Correspondingly, by 1979, as much as 3.05 m of LS had occurred in the Houston-Galveston area, Texas [1]. Approximately, 8,288 km^2 had subsided more than 30.5 cm in this region (see Figure 1), which has shifted the position of the coastline and damaged the distribution of wetlands and aquatic vegetation. LS is of particular concern in low-lying coastal areas such as the Houston-Galveston region. Subsidence in the region has increased the frequency and severity of flooding [5]. Low-pressure weather systems, such as tropical storms and hurricanes, result in high rates of precipitation and cause high tides to reach farther inland. Subsidence exacerbates the effects of storm surges and impedes storm water runoff by creating areas of decreased land-surface elevations where water accumulates. The latest flood caused by Hurricane Harvey (2017) in the Houston-Galveston region (HGR) was regarded as one of the costliest disasters in the U.S. history, with damage exceeding $100 billion. Subsidence has shifted the shoreline along Galveston Bay, as evidenced by the inundation of the Brownwood Subdivision associated with Hurricane Alicia in August 1983 near Baytown, Texas, and adjacent areas in the Houston-Galveston region, thereby changing the distribution of wetlands and aquatic vegetation [5]. In the 1950s and 1960s, local area governments began to analyze the serious and very real impact subsidence could have on the area's potential growth and quality of life, and, just as important, began to determine what exactly could be done about it. With a number of studies linking groundwater withdrawal to subsidence—and ongoing measurements confirming those findings—groups of citizens began to work for a reduction in groundwater use in the late 1960s. By 1973, the City of Galveston had begun converting to surface water supplied from Lake Houston, and from 1976 more sources from Trinity River and Brazos River started. The total source of the replenishment was increased from a little bit less than 300 MGD in 1976 to 750 MGD in 2017. In May of 1975, the Texas Legislator created the Harris-Galveston Subsidence District (HGSD), the first of its kind in the United States, to "end subsidence" and to restrict groundwater withdrawal. By 1976, HGSD had begun the process of compiling hydrologic information on the characteristics of the Chicot and Evangeline aquifers, engineering planning information on water usage and water supply in Harris and Galveston counties, and implementing regulatory procedures associated with their first groundwater regulatory plan. USGS measures groundwater levels in over 700 wells in an 11-county area annually in the Houston-Galveston region in order to develop a regional depiction of groundwater levels. The cumulative compaction in the Chicot and Evangeline aquifers are measured at 13 borehole extensometer stations in this region since 1973. The up to 44 years of extensometer compaction measurements, which was established based on the theory of aquifer system compaction due to ground fluid withdrawal with the above practice, can be employed to evaluate the long-term groundwater level change management on control of LS in the Houston-Galveston region, which is the motivation of this paper. It is assumed in this paper that a bulk land subsidence rate is the sum of inelastic and elastic compaction rates due to groundwater withdrawal and secondary consolidation rate due to geo-historical overburden pressure. The 'primary' compaction rate can be zero but the secondary consolidation rate might remain a pseudo-constant during a multi-year period in response to long-term consolidation lasting over 1000 years. The characteristics of these three distinct compaction or consolidation rates that combine to yield a bulk subsidence rate can be distinguished within the bulk borehole extensometer compaction data and groundwater level data when analyzed correctly. The secondary consolidation due to geo-historical overburden pressure and its pseudo-constant rate characteristic found with extensometer compaction data in this paper have not been recognized well in literature other than the primary components in unconsolidated or semi-consolidated aquifer systems in the world. It is showed in this paper that this secondary compaction is uncontrollable rather than primary compaction through long-term groundwater level management.

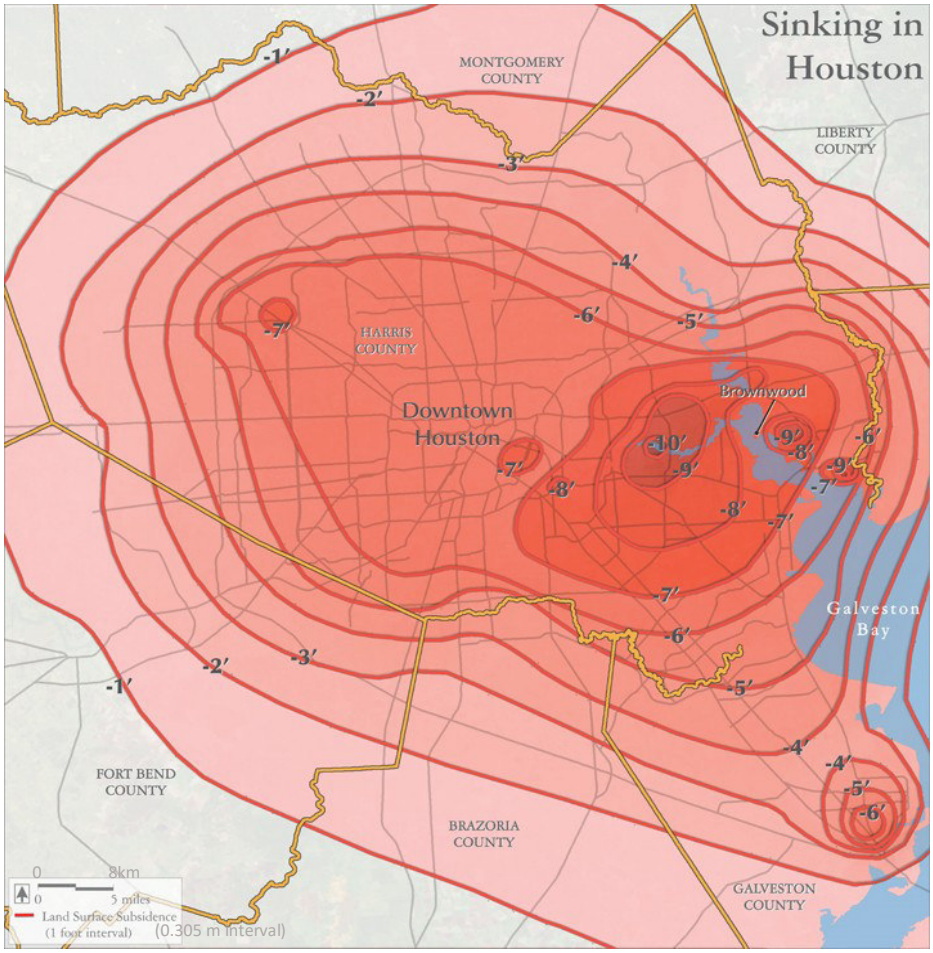


Figure 1. The observed land subsidence in the Houston-Galveston region [6], a historical flooding zone frequently hit by hurricanes such as Harvey, Ike, Allison, etc. (−1′ = −.305 m; −2′ = −0.610 m; −3′ = −0.915 m; −4′ = −1.22 m; −5′ = −1.525 m; −6′ = −1.83 m; −7′ = −2.135 m; −8′ = −2.440 m; −9′ = −2.745 m; −10′ = −3.05 m). (Image from TexasLandscapeProject.org; Map sources from U.S. Geological Survey (USGS) [6]).

2. Compressible Aquifer System

This section introduces three compressible aquifers and one compressible confining unit that exist in the HGR. Compaction of the aquifer systems was observed with borehole extensometers.

From northwest to southeast, the HGR includes Grimes County with a high elevation of close to 122 m, Montgomery County, Waller County, Harris County, and Galveston County with a low elevation of about 0 to 15 m along the coast of Gulf of Mexico (Figure 2) [7]. The three primary Quaternary and Tertiary aquifers in the Gulf Coast aquifer system in the Houston-Galveston region study area are the Chicot, Evangeline, and Jasper (Figures 2 and 3) [7–10], which are composed of laterally discontinuous deposits of gravel, sand, silt, and clay. The youngest and uppermost Quaternary aquifer, the Chicot aquifer, consists of Holocene- and Pleistocene-age sediments; the underlying Tertiary Evangeline aquifer consists of Pliocene- and Miocene-age sediments; and the oldest and most deeply buried Tertiary aquifer, the Jasper aquifer, consists of Miocene-age sediments (Figures 2 and 3) [5,7]. The lowermost unit of the Gulf Coast Tertiary aquifer system is the Miocene-age Catahoula confining system, which includes Catahoula Sandstone. The Catahoula confining system consists of sands in the upper section and clay and tuff interbedded with sand in the lower section.

Since about 1932, numerous authors have contributed to the body of knowledge and understanding of the complex stratigraphic and hydrogeologic relations of the Gulf Coast aquifer system in the Houston-Galveston study area (Figure 3) [7]. Using this information, a series of groundwater flow models were created, the most recent being by Kasmarek (2013) [6]; these models provide an evaluative tool that can be used by water-resource managers to help regulate and conserve the important natural water resource of the aquifer system and manage groundwater level changes in order to 'end subsidence'.

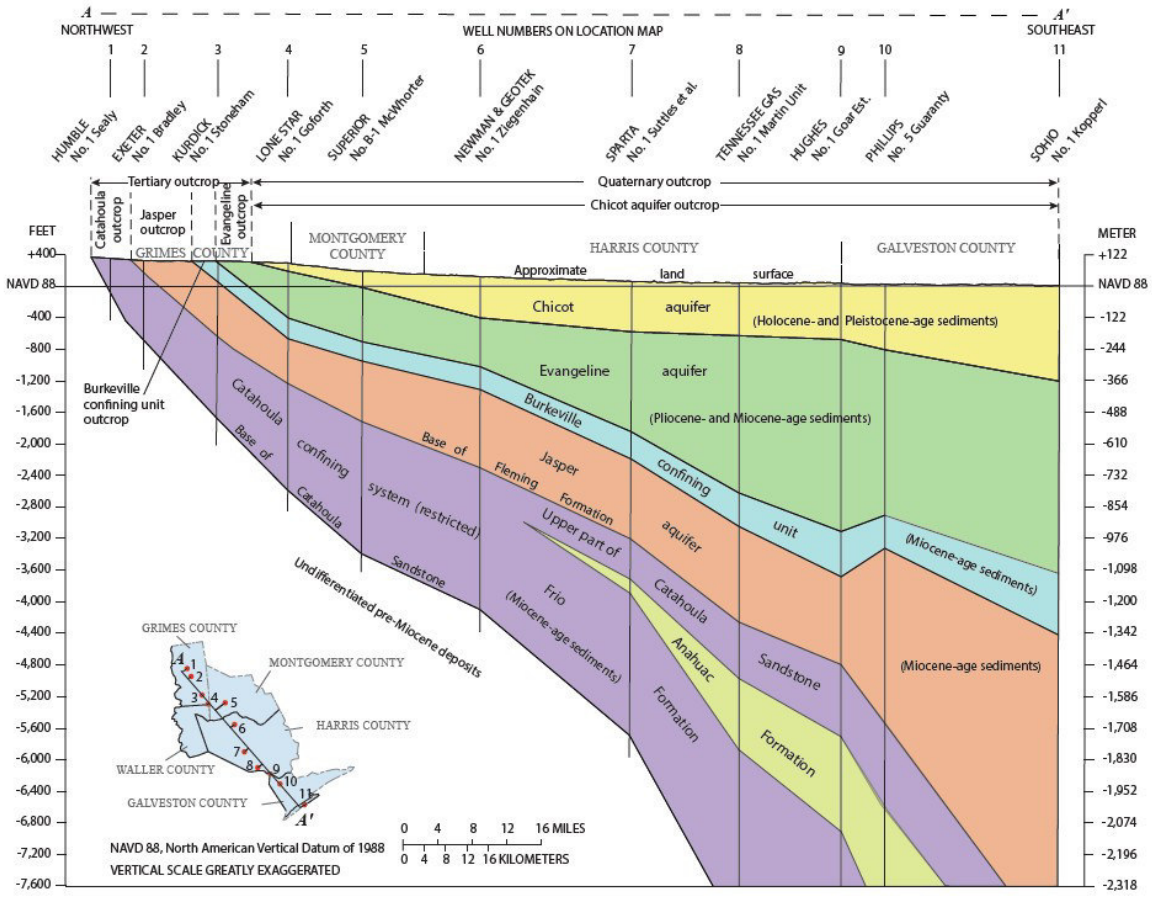


Figure 2. Hydrogeologic section A–A´ of the Gulf Coast aquifer system in Grimes, Montgomery, Harris, and Galveston Counties, Texas (modified from Kasmarek et al. (2016) [7] and Baker (1979, 1986) [8,9]. (Map source: USGS [7]).

The percentage of clay and other fine-grained clastic material generally increases with depth downdip [9]. Through time, geologic and hydrologic processes created accretionary sediment wedges (stacked sequences of sediments) more than 2318 m thick at the coast (Figure 2) [11,12]. The sediments composing the Gulf Coast aquifer system were deposited by fluvial–deltaic processes and subsequently were eroded and redeposited (reworked) by worldwide episodic changes in sea level (eustacy) that occurred as a result of oscillations between glacial and interglacial climate conditions [13]. The Gulf Coast aquifer system consists of hydrogeologic units that dip and thicken from northwest to southeast (Figure 2); the aquifers thus crop out in bands inland from and approximately parallel to the coast and become progressively more deeply buried and confined toward the coast [6]. The Burkeville confining unit is stratigraphically positioned between the Evangeline and Jasper aquifers (Figure 2), thereby restricting groundwater flow between the Evangeline and Jasper aquifers. There is no confining unit between the Chicot and Evangeline aquifers; therefore, the aquifers are hydraulically connected, which allows groundwater flow between the aquifers (Figure 2). Because of this hydraulic connection, water-level changes that occur in one aquifer can affect water levels in the adjoining aquifer [14].

Supporting evidence of the interaction of groundwater flow between the Chicot and Evangeline aquifers is demonstrated by comparing the two long-term (1977–2015) water-level-change maps [15], which indicate that the areas where water levels have risen or declined are approximately spatially coincident. Hydraulic properties of the Chicot aquifer do not differ appreciably from the hydrogeologically similar Evangeline aquifer, but can be differentiated on the basis of hydraulic conductivity [16]. From aquifer test data, Meyer and Carr (1979) [16] estimated that the transmissivity of the Chicot aquifer ranges from 915 to 7625 m^2/d and that the transmissivity of the Evangeline aquifer ranges from 915 to 4575 m^2/d. The Chicot aquifer outcrops and extends inland from the Gulf of Mexico coast and terminates at the most northern updip limit of the aquifer. The recharge rate across the outcrop area ranged from 6.35 mm/yr to 177.8 mm/yr [6]. Proceeding updip and inland of the Chicot aquifer, the older hydrogeologic units of the Evangeline aquifer, the Burkeville confining unit, and the Jasper aquifer sequentially outcrop (Figure 2). In the outcrop and updip areas of the Jasper aquifer, the aquifer can be differentiated from the Evangeline aquifer on the basis of the depths to water below land-surface datum, which are shallower (closer to land surface) in the Jasper aquifer compared to those in the Evangeline aquifer. Additionally, in the downdip parts of the aquifer system, the Jasper aquifer can be differentiated from the Evangeline aquifer on the basis of stratigraphic position relative to the elevation of the Burkeville confining unit (Figure 2).

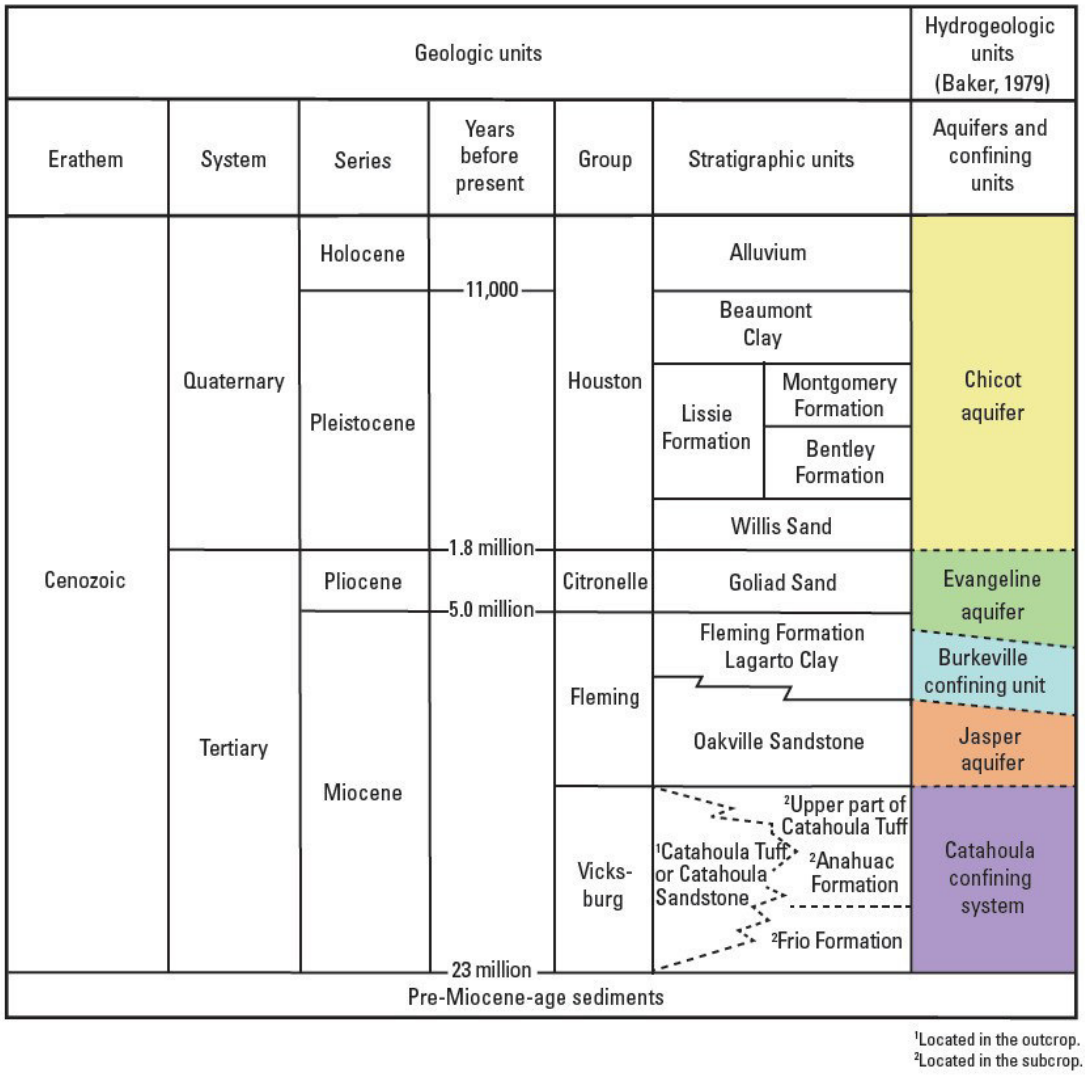


Figure 3. Geologic and hydrogeologic units of the Gulf Coast aquifer system in the Houston-Galveston region study area, Texas (modified by Kasmarek et al. (2016) [7] from [8–10]). (Map source: USGS [7]).

3. Borehole Extensometer

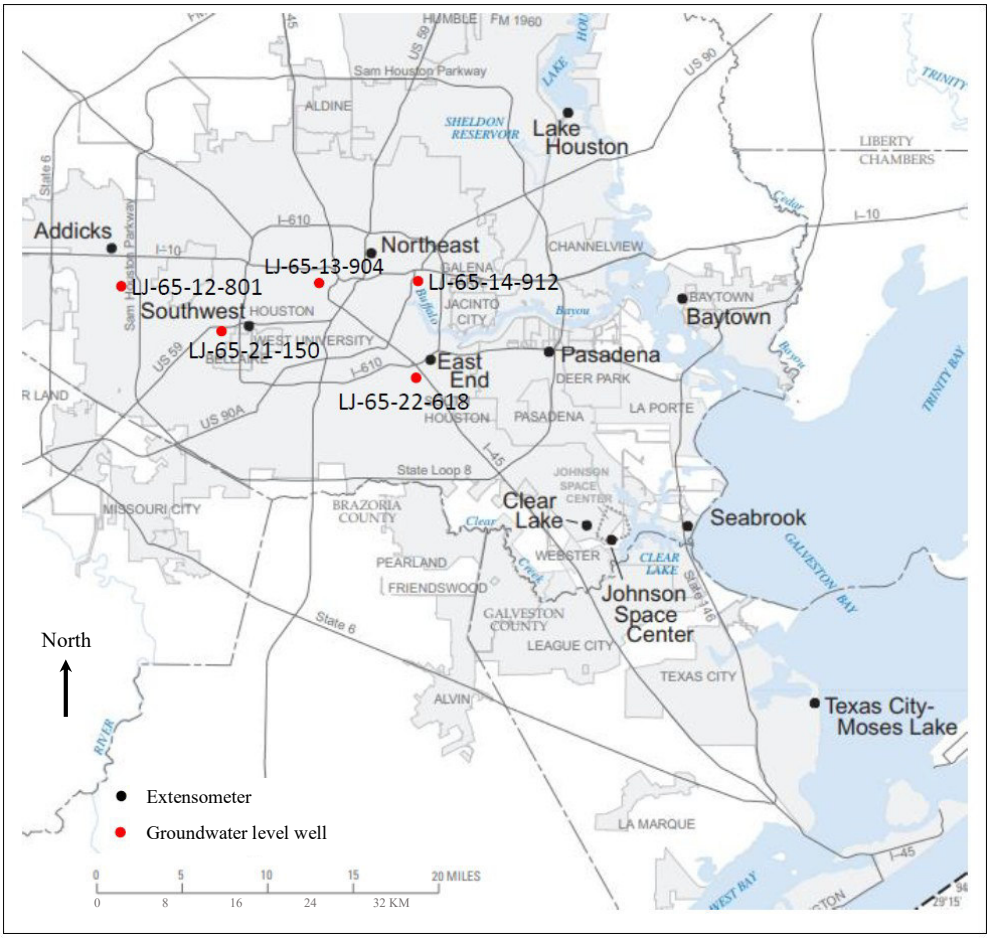


Figure 4. Location of borehole extensometer sites and selected groundwater level monitoring well sites, Houston-Galveston region, Texas [17]. (Note: The location of wells LJ-65-21-229 and LJ-65-21-227 is at the same location of extensometer Southwest). (Map source: USGS [17]).

This section introduces the borehole extensometer technology which has successfully measured the compaction of the compressible aquifer systems in the HGR.

Figure 4 shows the 11 borehole extensometer station locations in the Houston-Galveston region [17]. There are two extensometers (shallow and deep) at Baytown and Clear Lake stations, respectively. Each of the other nine stations has only one extensometer. In total, there are 13 extensometers. Figure 5 shows one example of a borehole extensometer at Pasadena in this region. Based on Gabrysch (1984) [18] and Kasmarek et al. (2015) [15], a borehole is first drilled to a predetermined depth, generally below the depth of expected water-level decline in order to construct an extensometer (example shown in Figure 5). A steel outer casing with a slip joint and screened interval is installed in the previously drilled borehole. The slip joint helps to prevent crumpling and collapse of the well casing as compaction of subsurface sediments occurs, while the screened interval allows groundwater to enter the outer casing and inner casing (piezometer) so that the depth to water below land surface can be determined for the aquifer at the depth of the screened interval. A substantial concrete plug is installed and set at the base of the extensometer, and after the concrete plug hardens, the smaller diameter inner pipe (often referred to as the 'extensometer pipe') is inserted down hole inside the outer casing and positioned to rest on the upper surface of the concrete plug at depth. Therefore, this rigid inner pipe extends vertically from the top of the concrete plug to slightly above land surface, thus providing a fixed reference elevation above land surface for measuring changes in land surface elevation. At land surface, a concrete slab is poured and connected to an array of vertical concrete piers extending down

into the water table. The concrete piers connect the slab to the underlying unconsolidated sediments penetrated by the borehole; this construction design helps to eliminate the continuous shrink and swell of the surficial clayey sediments associated with soil-moisture changes. A metal gage house (not depicted in Figure 5) is constructed on a concrete slab, and a shaft encoder and analog recorder are mounted to a steel table that is attached to the extensometer slab. A calibrated steel tape connects the recorder to the top of the inner pipe; because the steel table is anchored to the concrete slab, changes in land-surface altitude can be accurately measured and recorded. These recorded values through time represent the cumulative compaction that has occurred at the extensometer site. Because the extensometer functions as a piezometer and an extensometer, the cause and effect relation between the changes in water level in the aquifer and the changes in land-surface elevation can be established.

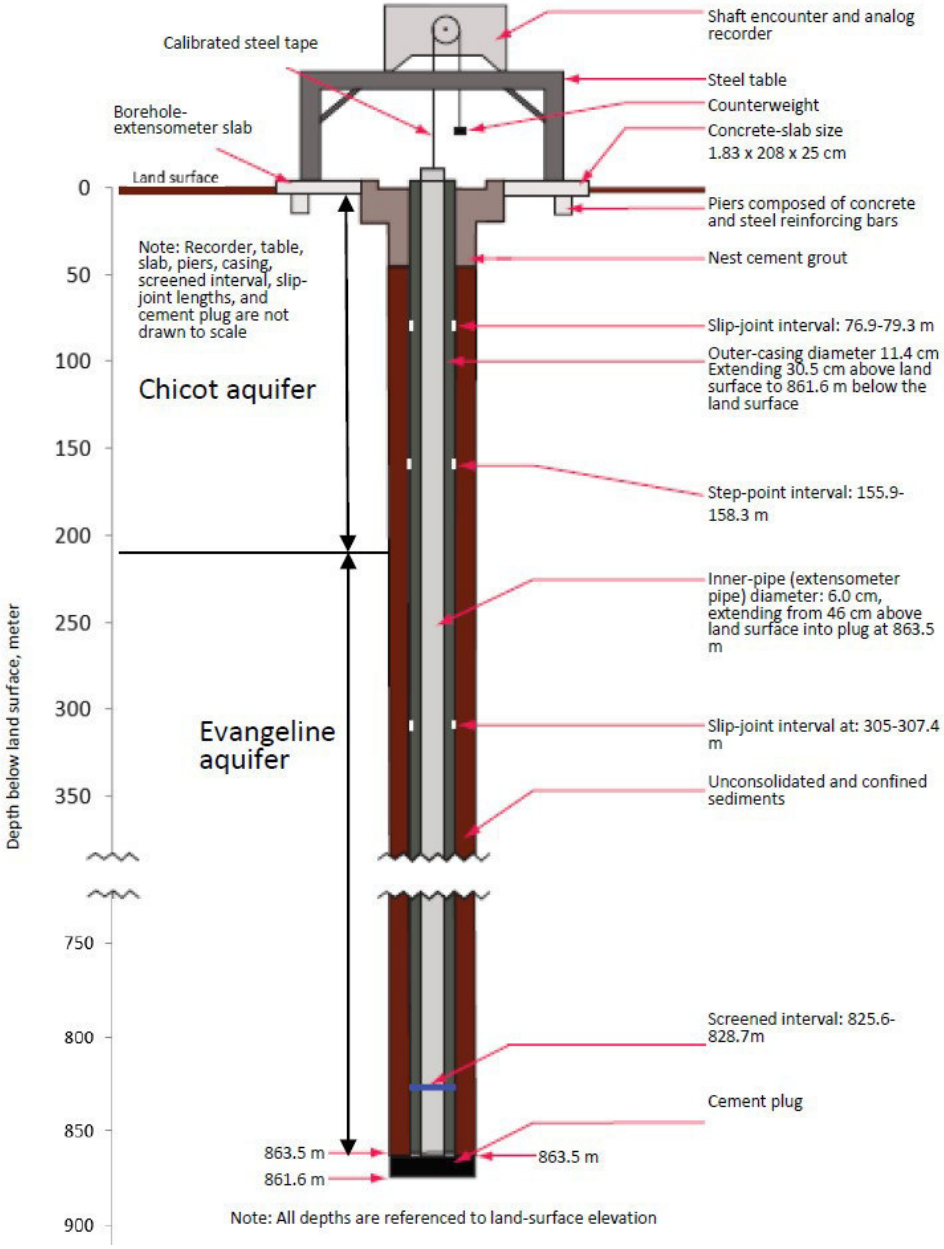


Figure 5. Example of cross-sectional perspective of the borehole extensometer/piezometer located at Pasadena, Texas (modified from [15]). (Map source: USGS [15]).

Borehole extensometer compaction data from the 11 sites (see Figure 4) are used to qualify compaction type and/or quantify the annual rate of compaction in the Chicot and Evangeline aquifers, thereby supporting groundwater level change management on control of land subsidence rates caused by changes in the amount of groundwater withdrawn from the Chicot and Evangeline aquifers. Five extensometers were installed in Harris (4) and Galveston (1) Counties and began recording compaction data in July 1973: East End, Baytown Shallow, Baytown Deep, and Seabrook in Harris County and Texas City in Galveston County (see Figure 4). The extensometer at Johnson Space Center had been installed in 1962 in Harris County but began recording compaction data in July 1973. Additional extensometers were added to the network during 1974–1976 in Harris County: Addicks in 1974, Pasadena in 1975, and Clear Lake Shallow and Clear Lake Deep in 1976 (see Figure 4). The final three extensometers were installed in Harris County in 1980: Lake Houston, Northeast, and Southwest (see Figure 4). Since activation or installation between 1973 and 1980, compaction data have been constantly recorded and periodically collected about every 28 days at the 13 extensometers on a routine basis, thereby providing site-specific rates of compaction accurate to within 0.3 mm [15].

4. Analysis Methodology

A pseudo-constant rate characteristic of secondary consolidation (creep) in compressible aquifer systems due to geo-historical overburden pressure is proposed with a new equation in this section after the variable rate characteristics of primary elastic and inelastic consolidation due to groundwater withdrawal are discussed. Then a combination equation of the pseudo-constant creep rate and the two variable rates of primary compaction is suggested to analyze an observed bulk compaction of compressible aquifer systems in response to groundwater level changes.

Almost all the permanent subsidence of a compressible aquifer system occurs due to the irreversible (or inelastic/nonrecoverable) compression or consolidation of aquitards through a slow (delayed) process of aquitard drainage [19]. This concept, which was labeled "the aquitard drainage model" by Helm [20], has formed the theoretical basis of many successful subsidence investigations [19,21–34]. The relation between changes in groundwater levels and compression of the aquifer system is based on the principle of effective stress first proposed by Karl Terzaghi [35]. By this principle, when groundwater level decreases due to discharges from an aquifer system, under a constant total load the support previously provided by the pore-fluid pressure will be transferred to the skeleton of the aquitard. Namely, the change in pore fluid pressure will be converted to effective stress on the skeleton of aquitards, which in turn causes the aquifer system's compaction. If the current effective stress is larger than the preconsolidation stress, the compaction is nonrecoverable (inelastic). In contrast, if effective stress is less than the preconsolidation stress, the compaction is recoverable (elastic) [1,24,30]. Conversely, when ground water level increases due to recharges to the aquifer system, the support previously provided by the skeleton reduces and the change in effective stress is shifted onto the pore fluid, which results in the aquifer system's elastic expansion. [1,24,30]. Therefore, in a general case the primary consolidation or compaction (s_p) can consist of two components: inelastic compaction (s_{p-v}) related to nonrecoverable specific skeletal storage (S_{skv}) of aquitard(s) or confining unit(s) and elastic compaction (s_{p-e}) associated with recoverable specific skeletal storage (S_{ske}) of aquitard(s) or confining unit(s) and sand layers in one aquifer system. Therefore, we have the following Equation (1)

$$s_p = s_{p-v} + s_{p-e} \tag{1}$$

The primary compaction rate can be described by Equation (2) from Equation (1)

$$\dot{s}_p = \dot{s}_{p-v} + \dot{s}_{p-e} \tag{2}$$

The S_{skv} values are two magnitude orders larger than the values of (S_{ske}) [29,30,36–41]. This leads to inelastic compaction dominating land subsidence when it happens. Based on Terzaghi's consolidation theory [42], both $\dot{s}_{p-v}$ and $\dot{s}_{p-e}$ can be considered to be zero approximately when their consolidation degrees reach 99.4% while time factor T_v ($= \Delta t/\tau'_0$, where Δt is real time [T] and τ'_0 is Terzaghi's time constant) equals 2.

Because of the weight of the overburden and the inelastic compaction characteristics of the clay layers, about 90 percent of the compaction is permanent [43]. Three main sedimentation stages are defined with respect to the concentration degree in self-weight consolidation as: the clarification regime, zone-settling regime, and compression regime [44]. The above Quaternary and Tertiary aquifer systems are still in the third compression stage. This compression was called as secondary consolidation (creep) by Taylor (1942) [45] or as "self-weight consolidation" by Been and Sills (1981) [46]. Therefore, it is assumed in this paper that secondary consolidation (creep) exists in the above unconsolidated aquifer systems due to geo-historical overburden pressure. For an unconsolidated sediment layer with an initial thickness of H [L], the secondary consolidation $s_{s(t)}$ can be approximated by Equation (3) [45]

$$s_{s(t)} = C_\alpha H \log\left(\frac{t}{t_1}\right) \tag{3}$$

where C_α is the dimensionless coefficient of secondary compression of the sediment layer, t_1 is an initial reference time for secondary compression, t is time larger than or equal to t_1. $\dot{s}_{s(t)} = (C_\alpha H/\ln 10)\frac{1}{t}$ follows from Equation (3) by taking the derivative with respect to time t for subsidence rate. The decrease percentage (D_S) of $\dot{s}_{s(t)}$ from t to $t + \Delta t$ can be derived by the authors with $D_S = 100[\dot{s}_{s(t)} - \dot{s}_{s(t+\Delta t)}]/\dot{s}_{s(t)}$ as

$$D_{s(t)} = \left(1 - \frac{t}{t + \Delta t}\right) \times 100 \tag{4}$$

D_s approaches zero when $t \gg \Delta t$, which implies that $\dot{s}_s \approx$ *a constant*. In other words, the changing value of $\dot{s}_s$ over the Δt period is difficult to be identified and can be ignored. This invariable rate is called a pseudo-constant rate of secondary consolidation in this paper. Table 1 shows how many years are needed for three different decrease percentages (1.0, 0.5 and 0.1%) of the specified subsidence rates in one given period. For example, if a period (Δt) is considered to be 10 years, 990, 1990, and 9990 years are needed for specified subsidence rate decrease percentages of 1.0, 0.5, and 0.1%, respectively. The secondary consolidation rate $\dot{s}_s$ is a pseudo-constant if 1.0, 0.5, and 0.1% subsidence rate changes are negligible. The secondary consolidation for the Quaternary and Tertiary sediments can be considered to have been more than 1000 yrs. since the youngest and uppermost sediments of the Holocene Chicot aquifer were formed in the Greenlandian Age (4200 to 8200 years ago) and the Northgrippian Age (8200 to 11,700 years ago).

Therefore a bulk subsidence rate $\dot{s}_{(t)}$ can be the sum of primary inelastic compaction rate $\dot{s}_{p-v(t)}$, primary elastic compaction rate $\dot{s}_{p-e(t)}$ and secondary compaction rate $\dot{s}_{s(t)}$, i.e.,

$$\dot{s}_{(t)} = \dot{s}_{p-v(t)} + \dot{s}_{p-e(t)} + \dot{s}_{s(t)} \tag{5}$$

Equation (5), which is suggested by the authors in this paper, is employed to analyze extensometer measured compaction rate for the three components in response to groundwater level changes in aquifers. Three distinct compaction characteristics for the three components must be correctly applied in this analysis: inelastic compaction rate $\dot{s}_{p-v(t)}$ is 10 to over 100 times larger than elastic compaction rate $\dot{s}_{p-e(t)}$ when groundwater level is lower than preconsolidation pressure head; elastic compaction rate $\dot{s}_{p-e(t)}$ can be negative (land rebounding) while inelastic compaction rate $\dot{s}_{p-v(t)}$ decreases rapidly but never negative when groundwater is recovering; and secondary compaction rate $\dot{s}_{s(t)}$ does not change with groundwater level.

Table 1. Time of the secondary consolidation needed for specified subsidence rate decrease in given periods.

	Given Time Period Δt in Equation (4), Years					
Ds [1]	5	10	20	30	40	50
1.0%	495 [2]	990	1980	2970	3960	4950
0.5%	995	1990	3980	5970	7960	9950
0.1%	4995	9990	19,980	29,970	39,960	49,950

[1]: D_S: the decrease percentage of $\dot{s}_s$ in Equation (4); and [2]: The subsidence rate change is 1.0% for a 5-year period when the secondary consolidation elapses 495 years.

5. Results

In this section, groundwater withdrawal historical characteristics are firstly outlined in four different periods before the temporal and spatial characteristics of groundwater level change are summarized corresponding to the four periods, respectively. Then the analysis methodology in Section 4 is applied to analyzing the starting and ending of primary consolidation and emerging of creep consolidation based on the observed relationship between groundwater level change and compaction, which leads findings of bulk pseudo-constant secondary consolidation rate value at each location of the 13 extensometers.

5.1. Groundwater Withdrawal

Artificial primary consolidation first occurred in the early 1900s in areas where ground water, oil, and gas were extracted. It continued throughout the 20th century due primarily to groundwater pumpage [1,6]. Groundwater withdrawal in the Houston-Galveston region experienced the following four periods (see Figure 6c) [6]: 1) Slight withdrawal of about 0.19 million m^3/day from 1891 to 1930 for 40 years; 2) Increasing withdrawal rates for 46 years from 0.57 million m^3/day in 1931 to 4.28 million m^3/day in 1976 with an average growth of 0.05 million m^3/day per year. Near Texas City the withdrawal of ground water for public supply and industry caused more than 0.5 m of subsidence between 1906 and 1943 [1]; 3) Decreasing withdrawal rates for 25 years from 4.28 million m^3/day in 1976 to 3.03 million m^3/day in 2001; and 4) Roughly stable withdrawal rates of around 3 million m^3/day from 2001 to current for more than 17 years.

5.2. Groundwater Level Changes

The lowering of groundwater level in the Houston-Galveston region due to groundwater withdrawal in Section 5.1 was observed by the USGS and simulated by them with MODFLOW [6]. Based on simulated results in Figure 6a,b, from 1891 to 1900 the groundwater levels were about 21.35 and 9.15 m in the Chicot and Evangeline aquifers, respectively. This would be close to the status in the predevelopment of groundwater before 1891. During 1901 to 1930 they were lowered to 8.2 and 5.2 m in the Chicot and Evangeline aquifers, respectively. By 1937, groundwater levels were falling in a growing set of gradually coalescing cones of depression centered on the areas of heavy use [1]. Based on measured results in Figure 6a,b, in 1977 the lowest groundwater levels were −2 and −86 m in the Chicot and Evangeline aquifers, respectively; then groundwater levels were raised about 41.5 m to −40 m in 2008 for Chicot aquifer and 43 m to −43 ft in 2008 for Evangeline aquifer. After 2008, groundwater levels have been roughly stable.

Figure 7a,b show the lowest groundwater level depression cones for Chicot and Evangeline aquifers, respectively, which were found by USGS Subsidence Reviewer. Through checking groundwater level data monitored and published by USGS, the lowest groundwater levels were −97.1 m on 1/12/1990 at Well LJ-65-21-150 for the Chicot aquifer and −125.0 m on 1/9/1984 at Well LJ-65-13-904 for the Evangeline Aquifer, respectively. The maximum drawdown caused by groundwater withdrawal was estimated to be about 112 m in 1990 for the Chicot aquifer and 134 m in 1984 for the Evangeline aquifer, respectively, in the Houston-Galveston region. Based on the two wells, groundwater levels were raised about 54.6 m to −42.4 m in 2010 for the Chicot aquifer and 64.4 m to −56.0 m in 2005 for the Evangeline aquifer. Chico aquifer and Evangeline aquifer groundwater levels were roughly stable after 2010 and

2005, respectively, at the two wells. The subsidence bowl in Figure 1 is consistent with the groundwater level depression cones in Figure 7a,b.

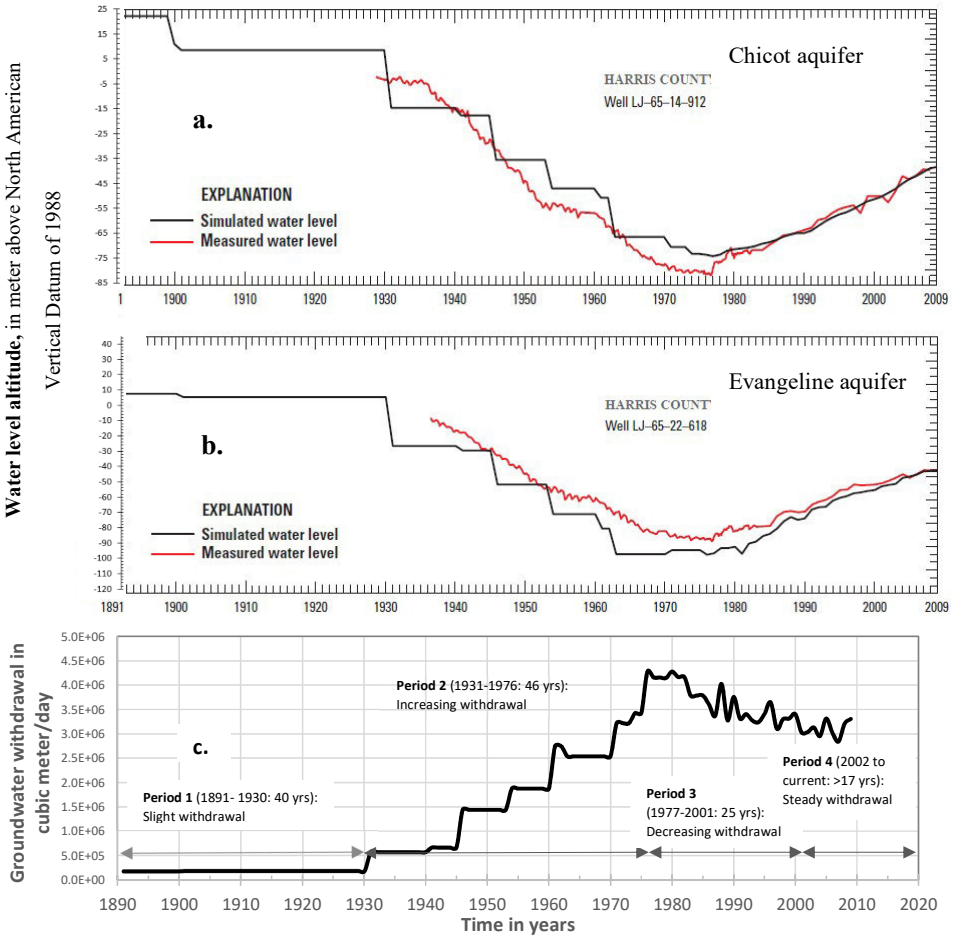
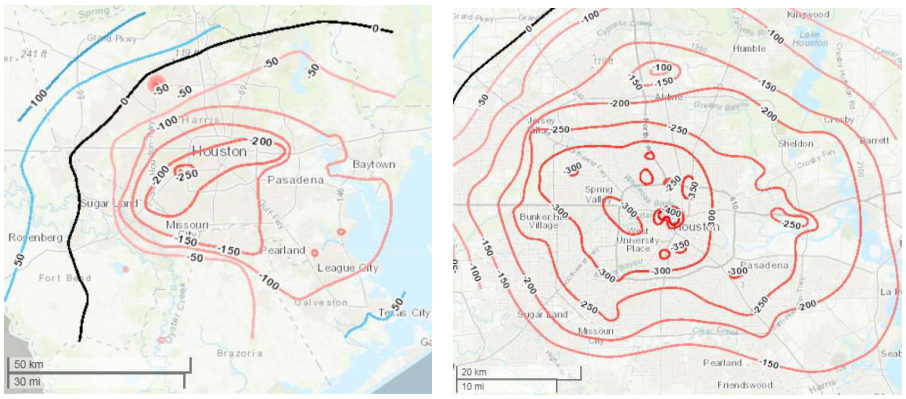


Figure 6. Groundwater withdrawal and ground water level fluctuations in the Houston-Galveston region: (**a**) Measured and simulated groundwater level in the Chicot aquifer (after [6]); (**b**) Measured and simulated groundwater level in Evangeline Aquifer (after [6]); and (**c**) Groundwater withdrawal (data from [6]). The location of water level well in Figure 6a,b can be find in Figure 4.



(**a**) (**b**)

Figure 7. Measured groundwater level depression cones (in ft (m): 100 (30.5), 50 (15.25), −50 (−15.25), −100 (−30.5), −150 (−45.75), −200 (−61.00), −250 (−76.25), −300 (−91.5), −350 (−106.75), −400 (−122.00)) (**a**) in Chicot aquifer (lowest: −318.5 ft (−97.14 m) on 1/12/1990); and (**b**) in Evangeline aquifer (lowest: −409.98 ft (−125.04 m) on 1/9/1984) (from USGS Subsidence Viewer on https://txpub.usgs.gov/houston_subsidence/home/).

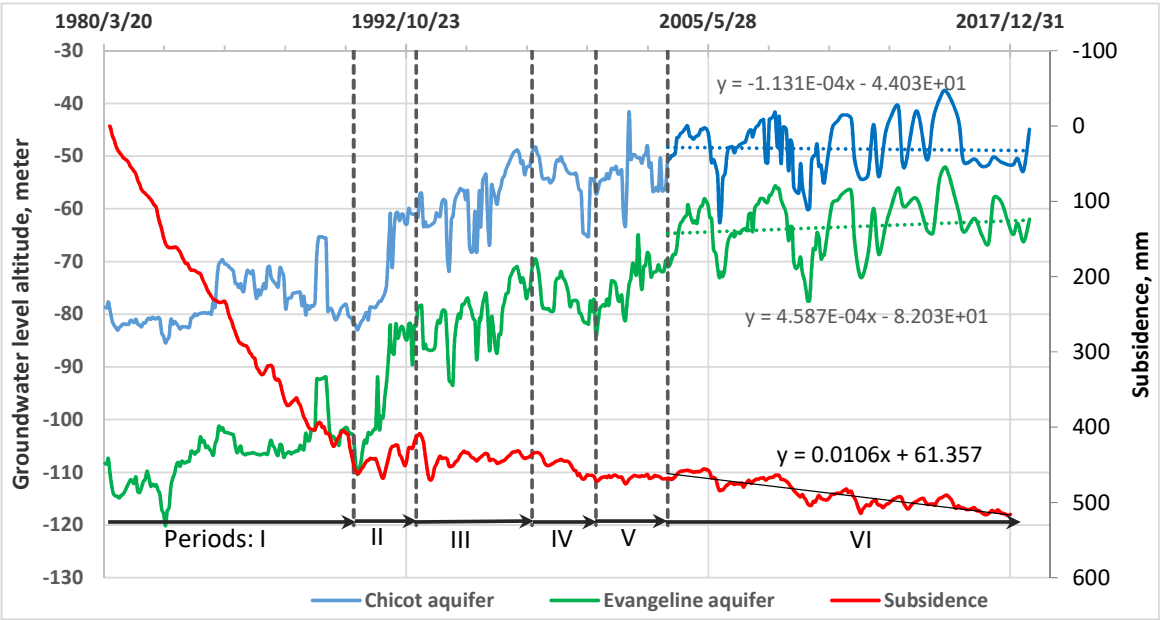


Figure 8. Groundwater levels in Chicot and Evangeline aquifers and land subsidence at extensometer site Southwest in the Houston-Galveston region. Calculated consolidation rates corresponding to groundwater levels during the following periods I (~ 8/16/1990) : $\dot{S}_{p-v} \gg \dot{S}_{p-e} + \dot{S}_s > 0$; II (8/16/1990 to 3/25/1993): $\dot{S}_{p-e} < 0$ (rebounding), $\dot{S}_{p-v} + \dot{S}_s > 0$ and $\dot{S} = \dot{S}_{p-v} + \dot{S}_{p-e} + \dot{S}_s < 0$ (rebounding from Equation (3)); III (3/25/1993 to 1/22/1998): $\dot{S}_{p-e} < 0$, $\dot{S}_{p-v} + \dot{S}_s > 0$ and $\dot{S} = \dot{S}_{p-v} + \dot{S}_{p-e} + \dot{S}_s \approx 0$; IV (1/22/1998 to 9/20/2000): $\dot{S}_{p-e} > 0$, $\dot{S}_{p-v} \to 0$ and $\dot{S} = \dot{S}_{p-v} + \dot{S}_{p-e} + \dot{S}_s > 0$; V (9/20/2000 to 9/18/2003): $\dot{S}_{p-e} < 0$, $\dot{S}_{p-v} \approx 0$ and $\dot{S} = \dot{S}_{p-e} + \dot{S}_s \approx 0$; and VI (9/18/2003 to 12/31/2017): $\dot{S}_{p-e} \approx 0$, $\dot{S}_{p-v} \approx 0$ and $\dot{S} = \dot{S}_{p-v} + \dot{S}_{p-e} + \dot{S}_s \approx \dot{S}_s$. The slope values in the trend equations for groundwater levels are expressed in m/day and the slope value in the trend equation for subsidence is in mm/day.

5.3. End of Primary Inelastic Compaction

It will be firstly demonstrated in detail in this section how Equation (5) is employed to correctly analyze inelastic, elastic, and secondary (creep) compaction characteristics in six different periods of groundwater level changes in the Chicot and Evangeline aquifers from 1980 to 2017 from the total compaction measurements of the two aquifer systems at extensometer site Southwest in the Houston-Galveston region (Figure 8). Then this method is applied to other 12 extensomter sites.

Only the Chicot aquifer and Evangeline aquifers are involved with the 12 extensometers except Baytown Deep at Baytown (see Figure 4). From Table 2, a total of 19 groundwater level wells in the two aquifers at or near the 11 extensometer station locations were employed in this paper to analyze the change of inelastic and elastic compaction and secondary consolidation in response to trends of groundwater level fluctuation based on the methodology in Section 4 (Equation (5)). As one example, Figure 8 shows the results based on analysis of observed land subsidence at borehole extensometer Southwest (Figure 4) from 17 June 1980 to 28 December 2017 and monitored groundwater levels at Chicot aquifer Well LJ-65-21-229 and Evangeline aquifer Well LJ-65-21-227 from 4 April 1980 to 1 October 2018. The preconsolidation hydraulic head was set to be −21.35 m in HAGM model [6] for the aquitards within the two aquifers. Six periods were divided based on variable rate characteristics of elastic, inelastic, and creep compaction corresponding to groundwater level change. From Figure 8 during Period I (4/4/1980~ 8/16/1990), Groundwater levels in the Chicot and Evangeline aquifers changed from −65 to −85 m and from −92 to −121 m, respectively. Both remained much lower than the −21.35 m of the initial preconsolidation pressure head. Thus, the inelastic compaction from the aquitards dominated the subsidence at this location: $\dot{S}_{(t)}$ was 46.92 mm/yr from 1980 to 1987 then decreased to 31.46 mm/yr from 1988 to 1990. The subsidence characteristics during Period I would be

$\dot{s}_{p-v} \gg \dot{s}_{p-e} + \dot{s}_s > 0$. During Period II (8/16/1990 to 3/25/1993), groundwater levels in the Chicot and Evangeline aquifers were raised from −83 to −60 m and from −118 to −82 m, respectively. The 23 m and 36 m groundwater level rise caused a land rebounding rate of 14.9 mm/yr. Thus, elastic rebounding of the two aquifers dominated the deformation at this location. The subsidence characteristics during Period II would be $\dot{s}_{p-e} < 0$, $\dot{s}_{p-v} + \dot{s}_s > 0$ and $\dot{s} = \dot{s}_{p-v} + \dot{s}_{p-e} + \dot{s}_s < 0$. During Period III (3/25/1993 to 1/22/1998), groundwater levels in the Chicot and Evangeline aquifers were further raised about 12 m to reach −51 m and about 9 m to −72 m, respectively. The further 9 to 12 m trend in groundwater level recovery did not cause further land rebounding although the elastic compaction rate $\dot{S}_{p-e}$ was less than zero. The trend in the subsidence rate approached approximately zero, which implies $\dot{s}_{p-v} + \dot{s}_s > 0$ and $\dot{s}_{p-v} + \dot{s}_s \approx -\dot{s}_{p-e}$ from Equation (5). Thus, the elastic rebounding of the two aquifers approximately offset the combination of inelastic compaction and secondary consolidation at this location. The subsidence characteristics during Period III would be $\dot{s}_{p-e} < 0$, $\dot{s}_{p-v} + \dot{s}_s > 0$ and $\dot{s} = \dot{s}_{p-v} + \dot{s}_{p-e} + \dot{s}_s \approx 0$. During Period IV (1/22/1998 to 9/20/2000), groundwater levels in the Chicot and Evangeline aquifers were lowered about 17 m to −65 m and about 13 m to −82 m, respectively. The 13 to 17 m groundwater level lowering caused land subsidence in trend and the elastic compaction rate $\dot{s}_{p-e}$ is larger than zero. The inelastic consolidation from aquitards within the two aquifers continued for more than about 21 yrs with a decreasing rate $\dot{s}_{p-v}$, which approached zero $\left(\dot{s}_{p-v} \to 0\right)$ within this period, since the regional lowest groundwater levels happened due to the maximum groundwater withdrawal during 1977 to 1984. The subsidence characteristics in Period IV would be $\dot{s}_{p-e} > 0$, $\dot{s}_{p-v} \to 0$ and $\dot{s} = \dot{s}_{p-v} + \dot{s}_{p-e} + \dot{s}_s > 0$. During Period V (9/20/2000 to 9/18/2003), groundwater levels in the Chicot and Evangeline aquifers were raised again about 5 m to −50 m and about 10 m to −70 m, respectively. The 5 to 10 m groundwater level rise caused neither further land rebounding nor significant subsidence. This happened only when inelastic compaction ceased $\left(\dot{s}_{p-v} \approx 0\right)$ and when elastic rebounding offset the secondary consolidation $(\dot{s}_s \approx -\dot{s}_{p-e})$. Thus, it would appear that the delay in compaction from inelastic specific skeletal storage of aquitards within the Chicot and Evangeline aquifers at extensometer site Southwest ceased during or before 2000. The subsidence characteristics in Period V would be $\dot{s}_{p-e} < 0$, $\dot{s}_{p-v} \approx 0$ and $\dot{s} = \dot{s}_{p-e} + \dot{s}_s \approx 0$. During the last Period VI (9/18/2003 to 12/28/2017), groundwater levels in the Chicot and Evangeline aquifers exhibited an almost stable trend of 1.13×10^{-4} m/day (Figure 8) (0.03 m/yr, Table 2) and 4.59×10^{-4} m/day (Figure 8) (0.14 m/yr, Table 2), respectively. This leads to the conclusion that the trend in elastic compaction can be considered negligible $\left(\dot{s}_{p-e} \approx 0\right)$. Only secondary consolidation emerged $(\dot{s}_s > 0)$ since both $\dot{s}_{p-e} \approx 0$ and $\dot{s}_{p-e} \approx 0$. Thus the subsidence characteristics in Period VI would be $\dot{s}_{p-e} \approx 0$, $\dot{s}_{p-v} \approx 0$ and $\dot{s} = \dot{s}_{p-v} + \dot{s}_{p-e} + \dot{s}_s \approx \dot{s}_s = 0.0106$ mm/day (3.87 mm/yr) (Figure 8).

The above analysis was applied to 10 other extensometer sites: Texas City, Seabrook, Johnson Space Center and Clear Lake (which share two of the same groundwater level wells), Baytown, Addicks, East End, Northeast, Pasadena, and Lake Houston with monitored groundwater level data from wells at or near the sites. Columns 5 and 6 in Table 2 give the approximate starting and ending dates, respectively, of the appearance of secondary consolidation at each extensometer site. The slope of the groundwater level trend is given in Column 7 in m/day and in Column 8 in m/yr during the appearance period at each site. All other 10 starting dates are after the starting date 9/18/2003 of the appearance of secondary consolidation at extensometer site Southwest.

The identified periods of the appearance of secondary consolidation for two extensometer groups (Baytown and Clear Lake and Space Center), in which each group shares same groundwater level monitoring wells, and another eight individual extensometers including Southwest are given in Table 2. All the periods are after the inelastic compaction ceased within Period V from 9/20/2000 to 9/18/2003 identified from Figure 8. The groundwater level trend values from 0.21 to 0.39 m/yr are a little bit large for extensometer sites East End, Northeast and Pasadena, but the groundwater level difference between the starting date and the ending date of the corresponding secondary consolidation appearance period is very small (0.02 to 0.14 m). This small groundwater level difference means the cumulative elastic deformation approached zero during the period.

Table 2. Secondary consolidation appearance periods based on groundwater level trend at or near extensometer sites in the Houston-Galveston region.

Extensometer		Well #	Aquifer	Secondary Consolidation Appearance Period		Groundwater Level Trend		Secondary Consolidation Rate $\dot{s}_s$	
	Depth, m			Starting Date	Ending Date	m/day *	m/yr	mm/day	mm/yr
Texas City	224	KH-64-33-901	Chicot	1/24/2008	1/14/2017	-8.73×10^{-5}	−0.03	2.222×10^{-4}	0.08
Seabrook	863	LJ-65-32-519 LJ-65-32-630	Chicot Evangeline	1/25/2008	1/14/2017	-2.77×10^{-5} -7.67×10^{-5}	−0.01 −0.03	8.317×10^{-3}	3.04
Space Center Clear Lake Deep	223 936 *	LJ-65-42-422 LJ-65-42-424	Chicot Evangeline	1/25/2007	12/20/2017	9.09×10^{-5} 6.79×10^{-5}	0.03 0.02	5.062×10^{-3} 3.033×10^{-3}	1.85 1.11
Baytown Shallow Baytown Deep	131 1475	LJ-65-16-933 LJ-65-16-931	Chicot Evangeline	5/26/2005 1/11/2007	5/28/2009	3.82×10^{-4} 9.21×10^{-5}	0.14 0.03	3.630×10^{-3} 5.956×10^{-3}	1.33 2.17
Addicks	550	LJ-65-12-729 LJ-65-12-726	Chicot Evangeline	10/1/2007	5/15/2014	2.73×10^{-4} 0.00	0.10 0.00	2.327×10^{-2}	8.49
East End	421	LJ-65-22-623 LJ-65-22-622	Chicot Evangeline	7/27/2007	1/13/2015	-2.72×10^{-4} 5.64×10^{-4}	−0.10 0.21 ^	4.926×10^{-3}	1.80
Northeast	550	LJ-65-14-745 LJ-65-14-746	Chicot Evangeline	1/4/2008	3/1/2011	5.27×10^{-4} 1.07×10^{-3}	0.19 0.39 ^^	1.150×10^{-2}	4.20
Pasadena	863	LJ-65-23-321 LJ-65-23-326	Chicot Evangeline	1/5/2007 2/6/2007	1/5/2011 3/30/2010	3.76 × 10-6 8.39×10^{-4}	0.00 0.31 ~	6.032×10^{-3}	2.20
Lake Houston	719	LJ-65-07-902 LJ-65-07-908	Chicot Evangeline	1/7/2004	4/4/2007	8.38×10^{-5} 1.24×10^{-4}	0.03 0.05	3.760×10^{-3}	1.37
Southwest	719	LJ-65-21-229 LJ-65-21-227	Chicot Evangeline	9/18/2003	10/18/2018	-1.13×10^{-4} 4.59×10^{-4}	−0.04 0.17	1.042×10^{-2}	3.80

*: Clear Lake Deep is 936 m deep and Clear Lake Shallow is 226 m deep. ^: The difference of groundwater level between −42.75 m on 5/7/2008 and −42.77 m on 11/3/2014 is 0.02 m. ^^: The difference of groundwater level between −54.14 m on 1/4/2008 and −54.18 m on 3/1/2011 is 0.04 m. ~: The difference of groundwater level between −40.03 m on 2/6/2007 and −40.17 m on 3/30/2010 is 0.14 m.

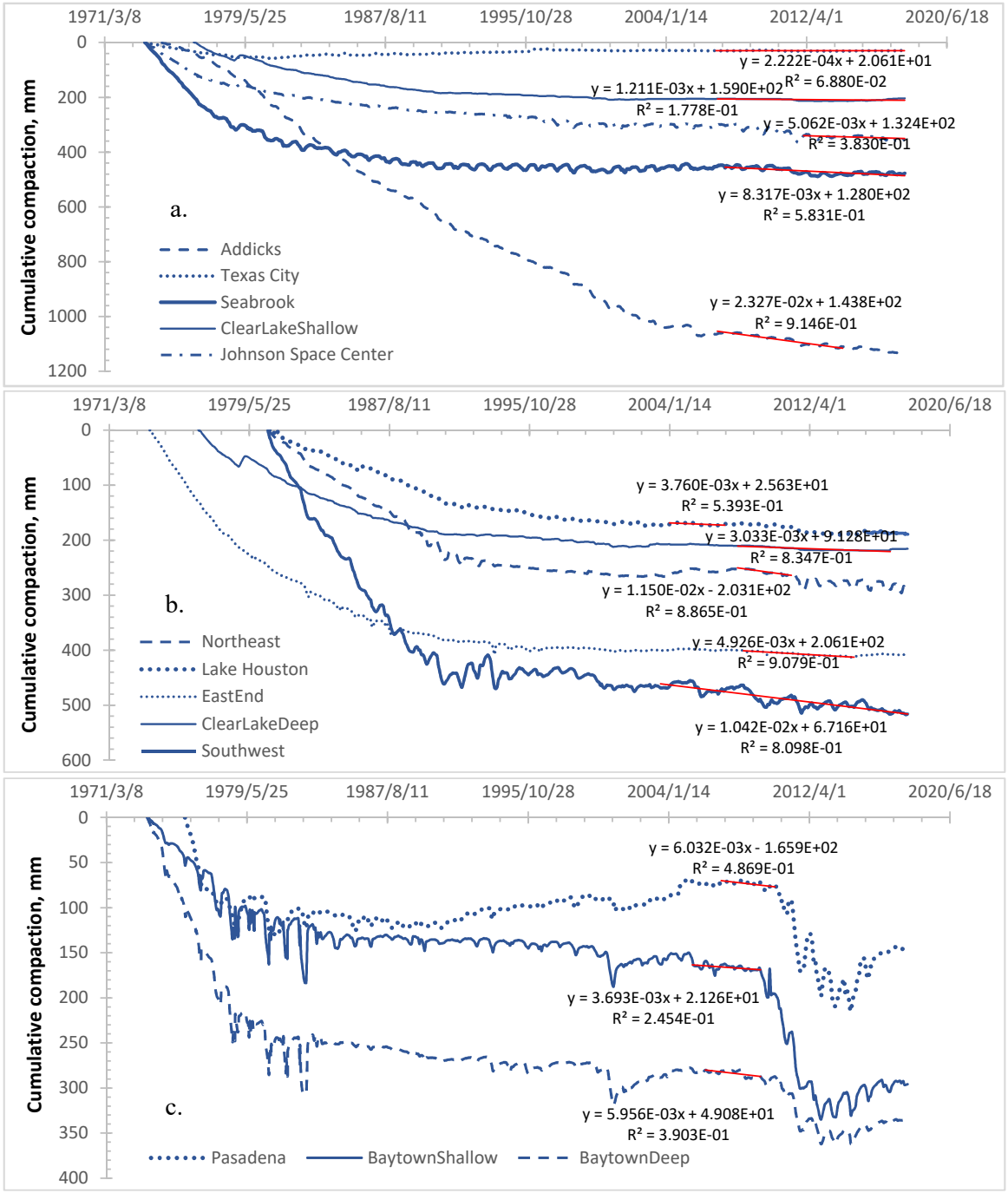


Figure 9. Linear trends of secondary consolidation from observed cumulative compactions at 13 extensometer locations in the Houston-Galveston region (data source: USGS). The secondary consolidation period for each site is given in Table 2. The slope values in the trend equations are in mm/day. (**a**): 5 extensometers Addicks, Texas City, Seabrook, ClearLakeShallow, and Johnson Space Center; (**b**): 5 extensometers Northeast, Lake Houston, EastEnd, ClearLakeDeep, and Southwest; and (**c**): 3 extensometers: Pasadena, BaytownShallow, and BaytonDeep.

Figure 9 shows the measured cumulative subsidence curves with time at the 13 extensometer sites in the Houston-Galveston region. The secondary consolidation trend line and equation during stable groundwater level periods identified in Table 2 are shown for each subsidence curve in Figure 9. The reason for the huge subsidence fluctuations at Baytown Shallow and Deep and Pasadena from 2010 to 2014 (see Figure 9c) has not previously been well understood based on Kasmarek et al. (2016) [7]

and the author's (Y. Liu) personal discussion with USGS hydrologist, Jason Ramage. Ramage wrote in his email that water usage in the area has not increased. The only other physical factor he could postulate is reaction along faults in the area, which was detected by mapping ground deformation with multi-temporal InSAR [4]. However, if this were the case, he would still think all extensometer locations would be affected similarly. All other sites present slightly or little increased subsidence rate over this period of 2010 to 2014 (Figure 9a,b) as pointed out by Kasmarek (2016) [7], but it still seems apparent that secondary compaction at all other 10 extensometer sites has likely dominated land subsidence without primary inelastic consolidation occurring since around 2003. Although secondary consolidation will continue for a very long period into future, inelastic and elastic compaction has fully and successfully been placed under control in the Houston-Galveston region since 2003. This achievement, the controlled land subsidence due to groundwater withdrawal, contributes to a long-term groundwater level change management from 1977 to 2002. This groundwater level change management recovered the lowest groundwater levels in the Chicot and Evangeline aquifers produced by a high groundwater withdrawal of about 4.3 million m^3/day during 1977 and 1984 to expected high stable groundwater levels in the two aquifers by decreasing that withdrawal to about 3.0 million m^3/day since around 2002.

The temporal variation of the pseudo-constant secondary consolidation could not be identified well from the current compaction observations in the HGR because its emerging period is just 2 to 15 years from Figure 9 and Table 2. However, the secondary consolidation rate of 0.08 to 8.49 mm/yr spatially varies significantly with location. The reason for this spatial variation would include total thickness of compressible aquifer systems, clay cumulative thickness percentage, individual aquitard thickness [30], and overburden pressure history. For example, the reason for the minimum creep rate of 0.08 mm/yr at Texas City would be (1) the total compressible aquifer system is 244 m of the Chicot aquifer; (2) the percentage of clay cumulative thickness in the Chicot aquifer is about 20.8% [14], which is the minimum value at the 13 extensometer locations with average of 52.1%; (3) the equivalent thickness of aquitards [30] would be very thin. However, the creep rate of 1.33 mm/yr at Baytown Shallow is 16.6 times larger than 0.08 mm/yr at Texas City probably because the clay percentage is 50.0% in the 131 m thick Chicot aquifer, its equivalent aquitard thickness would be larger, and the Chicot aquifer has the shortest overburden pressure history in the four compressible aquifer systems.

6. Conclusion

Based on the aquitard drainage model [20], primary consolidation (or compaction) consists of two components: inelastic compaction from nonrecoverable specific skeletal storage of aquitard(s) or confining unit(s) and elastic compaction from recoverable specific skeletal storage of aquitard(s) or confining unit(s) and sand layers in the aquifer system.

After primary inelastic consolidation is completed and when primary elastic consolidation rate trends to zero, the remaining compaction of an unconsolidated or semi-consolidated aquifer system measured by a borehole extensometer is considered here to be the secondary (creep) consolidation due to geo-historical overburden pressure. Based on Taylor's (1942) secondary consolidation theory, the rate of secondary consolidation behaves like a pseudo-constant, especially if it has elapsed over 1000 years. Secondary consolidation within the Chicot and Evangeline aquifer system has likely existed for at least for 1000 years since the youngest and uppermost sediments of the Holocene Chicot aquifer were formed in the Greenlandian Age (4200 to 8200 years ago) and the Northgrippian Age (8200 to 11,700 years ago).

A bulk land subsidence rate is assumed to be the sum of inelastic and elastic compaction rates due to groundwater withdrawal (the traditional primary consolidation process of geotechnical engineers) and a secondary consolidation rate due to geo-historical overburden pressure. Primary compaction/consolidation can disappear under groundwater level recovery management, but secondary consolidation continues at a pseudo-constant rate during a long-term consolidation period such as over 1000 years.

As much as 3.05 m of land subsidence was measured in 1979 in the Houston-Galveston region. It was largely a result of inelastic/nonrecoverable compaction within the Chicot and Evangeline aquifers from 1937 to 1979 and reflected the continuous changes in the preconsolidation pressure head within the aquitards that lie within these two aquifer systems. All these changes were due in turn to groundwater levels lowering in response to a continuous increase in groundwater withdrawal rates from 0.57 million m^3/day to 4.28 million m^3/day. Groundwater level recovery management from 1979 to 2000 successfully decreased inelastic compaction from ~40 mm/yr to zero by decreasing groundwater withdrawal rates from 4.3 million m^3/day to 3.0. A little rebounding of the land surfaces was achieved from this management of groundwater levels. An additional pseudo-constant secondary consolidation rate of 0.08 to 8.49 mm/yr emerged from field extensometer data as a result of the analysis described in the present study. This additional skeletal compression occurred while the groundwater levels in the two aquifers were being managed. The trends in this secondary compression have tended to remain stable since 2000. The secondary consolidation process would be beyond any current groundwater level change management scheme because it is likely caused by geo-historical overburden pressure upon and within the two aquifers.

Borehole extensometer compaction measurements not only successfully corroborate the efficacy of the groundwater level change management process for controlling land subsidence, but they also reveal for the first-time secondary consolidation subsidence in the Quaternary and Tertiary aquifer systems in the Houston-Galveston region.

It should be pointed out that a reason for the huge subsidence fluctuations at Baytown Shallow and Deep and at Pasadena from 2010 to 2014, which previously has not been well understood, would likely be not only primary but also secondary compaction.

Author Contributions: Conceptualization, Y.L.; Data curation, Y.L.; Formal analysis, Y.L.; Funding acquisition, J.L, Y.L. and Z.N.F.; Investigation, Y.L.; Methodology, Y.L.; Project administration, J.L., Y.L. and Z.N.F.; Supervision, J.L., Y.L. and Z.N.F.; Writing—original draft, Y.L.; Writing—review & editing, Y.L., J.L. and Z.N.F.

Funding: This research is supported by the National Science Foundation (NSF) grant no. 1832065 entitled "Identification of urban flood impacts caused by land subsidence and sea level rise in the Houston-Galveston region".

Acknowledgments: The authors thank NSF for supporting this research through grant no. 1832065. The authors express their gratitude to Jason Ramage for his help in data collection, explanation, and fixing and William Mike Chrismer for his help in data collection. The authors appreciate Donald C. Helm and four anonymous reviewers for their constructive comments for improving the manuscript. The compaction data and groundwater data are from USGS (https://txpub.usgs.gov/houston_subsidence/home/).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Galloway, D.L.; Jones, D.R.; Ingebritsen, S.E. *Land Subsidence in the United States*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1999.
2. Galloway, D.L.; Sneed, M. Analysis and simulation of regional subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA. *Bol. Soc. Geol. Mex.* **2013**, *65*, 123–136. [CrossRef]
3. Pratt, W.E.; Johnson, D.W. Local subsidence of the Goose Creek oil field. *J. Geol.* **1926**, *34*, 577–590. [CrossRef]
4. Qu, F.; Lu, Z.; Zhang, Q.; Bawden, G.W.; Kim, J.W.; Zhao, C.; Qu, W. Mapping ground deformation over Houston – Galveston, Texas using multi-temporal InSAR. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *169*, 290–306. [CrossRef]
5. Coplin, L.S.; Galloway, D.L. Houston-Galveston, Texas: managing coastal subsidence. In *Land Subsidence in the United States*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1999; pp. 35–46.
6. Kasmarek, M.C. *Hydrogeology and Simulation of Groundwater Flow and Land-Surface Subsidence in the Northern Part of the Gulf Coast Aquifer System, Texas, 1891–2009*; Scientific Investigation Report 2012-5154; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2013.

7. Kasmarek, M.C.; Ramage, J.K.; Johnson, M.R. *Water-Level Altitudes 2016 and Water-Level Changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper Aquifers and Compaction 1973–2015 in the Chicot and Evangeline Aquifers, Houston–Galveston Region, Texas*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2016.
8. Sellards, E.H.; Adkins, W.S.; Plummer, F.B. The Geology of Texas: Volume 1 Stratigraphy. *Univ. Texas Bull.* **1932**, no. 3232, 1007.
9. Baker, E.T. *Stratagraphic and Hydrogeologic Framework of Part of the Texas Coastal Plain*; Texas Department of Water Resources: Austin, TX, USA, 1979.
10. Meyer, W.R.; Carr, J.E. *A Digital Model for Simulation of Groundwater Hydrology in the Houston Area, Texas*; Texas Department of Water Resources: Austin, TX, USA, 1979.
11. Baker, E.T. *Hydrology of the Jasper Aquifer in the Southeast Texas Coastal Plain*; Texas Department of Water Resources: Austin, TX, USA, 1986.
12. Chowdhury, A.H.; Turco, M.J. Geology of the Gulf Coast aquifer, Texas. In *Aquifers of the Gulf Coast of Texas*; Mace, W.F., Davidson, R.E., Angle, S.C., Mullican, E.S., Eds.; Texas Water Development Board: Austin, TX, USA, 2006; pp. 23–50.
13. Lambeck, K.; Esat, T.M.; Potter, E.K. Links between climate and sea levels for the past three million years. *Nature* **2002**, *419*, 199–206. [CrossRef] [PubMed]
14. Kasmarek, M.C.; Robinson, J.L. *Hydrogeology and Simulation of Groundwater Flow and Land-Surface Subsidence in the Northern Part of the Gulf Coast Aquifer System, Texas*; Scientific Investigation Report 2004-5102; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2004.
15. Kasmarek, M.C.; Ramage, J.K.; Houston, N.A.; Johnson, M.R.; Schmidt, T.S. *Water-Level Altitudes 2015 and Water-Level Changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper Aquifers and Compaction 1973–2014 in the Chicot and Evangeline Aquifers, Houston–Galveston Region, Texas*; Scientific Investigations Map 3337; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2015.
16. Carr, J.E.; Meyer, W.R.; Sandeen, W.M.; McLane, I.R. *Digital Models for Simulation of Groundwater Hydrology of the Chicot and Evangeline Aquifers along the Gulf Coast of Texas*; Report 289; Texas Department of Water Resources: Austin, TX, USA, 1985.
17. Kasmarek, M.C.; Lanning-Rush, J. *Water-Level Altitudes 2003 and Water-Level Changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper Aquifers and Compaction 1973 – 2002 in the Chicot and Evangeline Aquifers, Houston-Galveston Region, Texas*; Open-File Report 2003-109; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2003.
18. Gabrysch, R.K. *Groundwater Withdrawal and Land-Surfae Subsidence in the Houston-Galveston Region, Texas, 1906-80*; Open-File Report 82-571; Texas Department of Water Resources: Austin, TX, USA, 1984; pp. 1–62.
19. Tolman, C.F.; Poland, J.F. Groundwater infiltration, and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California. *Eos Trans. AGU* **1940**, *21*, 23–34. [CrossRef]
20. Helm, D.C. Field-based computational techniques for predicting subsidence due to fluid withdrawal. *Geol. Soc. Am. Rev. Eng. Geol.* **1984**, *6*, 1–22.
21. Poland, J.F.; Green, J.H. *Subsidence in the Santa Clara Valley, California—A Progress Report*; U.S. Geolorical Survey Water-Supply Paper 1619-C; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1962; p. 16.
22. Holzer, T.L. History of the aquitard-drainage model in land subsidence case studies and current research. In *Land Subsidence Case Studies and Current Research: Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence*; Association of Engineering Geologists: Belmont, CA, USA, 1998; pp. 7–12.
23. Riley, F.S. Mechanics of aquifer systems-The scientific legacy of Joseph F. Poland. In *Land Subsidence Case Studies and Current Research: Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence*; Association of Engineering Geologists: Belmont, CA, USA, 1998; pp. 13–27.
24. Liu, Y.; Helm, D.C. Inverse procedure for calibrating parameters that control land subsidence caused by subsurface fluid withdrawal: 1. Methods. *Water Resour. Res.* **2008**, *44*. [CrossRef]
25. Green, J.H. *Compaction of the Aquifer System and Land Subsidence in the Santa Clara Valley, California, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1779-T*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1964; p. 11.
26. Poland, J.F.; Ireland, R.L. *Land Subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982: U.S. Geological Survey Professional Paper 497-F*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1988; p. 61.
27. Poland, J.F. Land subsidence in the San Joaquin Valley and its effect on estimates of groundwater resoruces. *Comm. Sub Terranean Waters Publ.* **1960**, *52*, 325–335.
28. Miller, R.E. *Compaction of an Aquifer System Computed from Consolidation Tests and Decline in Artesian Head, U.S. Geological Survey Professional Paper 424-B*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1961; pp. B54–B58.

29. Riley, F.S. Analysis of borehole extenso meter data from central California. *Land Subsid.* **1969**, *2*, 423–431.
30. Helm, D.C. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, Calif., part 1. Constant parameters. *Water Resour. Res.* **1975**, *11*, 465–478. [CrossRef]
31. Poland, J.F.; Lofgren, B.E.; Ireland, R.L.; Pugh, R.G. *Land Subsidence in the San Joaquin Valley, California as of 1972: U.S. Geological Survey Professional Paper 43 7-H.*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1975; p. 78.
32. Ireland, R.L.; Poland, J.F.; Riley, F. *Land Subsidence in the San Joaquin Valley, California as of 1980: U.S. Geological Survey Professional Paper 43 7-I*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1984; p. 93.
33. Helm, D.C. One-dimensional simulation of aquifer system com- paction near Pixley, California: 2. Stress-dependent parameters. *Water Resour. Res.* **1976**, *12*, 375–391. [CrossRef]
34. Helm, D.C. *Estimating Parameters of Compacting Fine-Grained Interbeds within a Confined Aquifer System by a One-Dimensional Simulation of Field Observations*; IAHS Publ.: Wallingford, UK, 1976; pp. 145–156.
35. Terzaghi, K. Principles of soil mechanics, IV-Settlement and consolidation of clay. *Eng. News-Record* **1925**, *95*, 974–978.
36. Helm, D.C. Field verification of a one-dimensional mathematical model for transient compaction and expansion of a confined aquifer system. In *Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering*; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 1978.
37. Epstein, V.J. Hydrologic and Geologic Factors Affecting Land Subsidence near Eloy, Arizona. *Water Resour. Invest. Rep.* **1987**, *87*, 4143.
38. Hanson, R.T. Aquifer-System Compaction, Tucson Basin and Avra Valley. *Water Resour. Invest. Rep.* **1989**, *88*, 4172.
39. Sneed, M.; Galloway, D.L. Aquifer-System Compaction and Land Subsidence: Measurements, Analyses, and Simulations—the Holly Site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California. Available online: https://pubs.usgs.gov/wri/2000/wri004015/pdf/wrir004015.pdf (accessed on 14 May 2019).
40. Pope, J.P.; Burbey, T.J. Multiple-aquifer characterization from single borehole extensometer records. *Ground Water* **2004**, *42*, 45–58. [CrossRef] [PubMed]
41. Liu, Y.; Helm, D.C. Inverse procedure for calibrating parameters that control land subsidence caused by subsurface fluid withdrawal: 2. Field application. *Water Resour. Res.* **2008**, *44*, 1–16. [CrossRef]
42. Terzaghi, K. Settlement and consolidation of clay. In *Principles of Soil Mechanics*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1925; Volume IV, pp. 874–878.
43. Gabrysch, R.K.; Bonnett, C.W. *Land-Surface Subsidence in the Houston-Galveston Region, Texas*; Texas Water Development Board: Austin, TX, USA, 1975.
44. Fitch, B. Kynch theory and compression zones. *AIChE J.* **1983**, *29*, 940–942. [CrossRef]
45. Taylor, D.W. *Research on Consolidation of Clays*; Publication 82; Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA, 1942.
46. Been, K.; Sills, G.C. Self-weight consolidation of soft soils: An experimental andtheoretical study. *Geotechnique* **1981**, *31*, 519–535. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS)



Product User Manual

Date: **17/05/2022**
Doc. Version: **1.6**

Contract ID:
SPECIFIC CONTRACT No 3436/R0-COPERNICUS/EEA.58362

Implementing Framework service contract No EEA/DIS/R0/20/011

Start date: 01-01-2021
End date: 31-12-2021

Consortium ORIGINAL (OpeRatIonal Groundmotion INsar ALliance), composed by:

Document Control Information

Settings	Value
Document Title:	Product User Manual
Project Title:	EGMS-SC1
Document Author:	Paul Kotzerke Robert Siegmund Jürgen Langenwalter
Project Owner:	Henrik Steen Andersen (EEA)
Project Manager:	Sergio Proietti (e-GEOS)
Document Code:	EGMS-D4-PUM-SC1-2.0-007
Document Version:	1.6
Distribution:	Public
Date:	17/05/2022

Document Approver(s) and Reviewer(s):

Name	Role	Action	Date
Paul Kotzerke	Document Owner	Review	17/05/2022
< TSC members>	Original Consortium Technical Steering Committee	Review	17/05/2022
Henrik Steen Andersen	Project Officer (EEA)	Approve	17/05/2022

Document history:

Revision	Date	Created by	Short Description of Changes
draft 1.0	18/06/2021	Paul Kotzerke	Initial version
draft 1.1	15/10/2021	Paul Kotzerke	Updated according to review by EEA
draft 1.2	14/02/2022	Paul Kotzerke	Updated according to review by EEA
draft 1.3	31/03/2022	Paul Kotzerke	Updated according to review by EEA
draft 1.4	31/03/2022	Paul Kotzerke	Updated according to review by EEA
draft 1.5	06/05/2022	Paul Kotzerke	Updated according to review by EEA
1.6	17/05/2022	Paul Kotzerke	Updated according to review by EEA

TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION 7

1.1. REFERENCES AND RELATED DOCUMENTS 8

2. FREQUENTLY ASKED QUESTIONS 9

3. PRODUCT DESCRIPTION 11

3.1. PRODUCT QUALITY CONTROL 11
3.2. PRODUCTION METHODOLOGY 12
3.3. SATELLITE DATA INPUT 13
3.4. THE EGMS *BASIC* PRODUCT 13
3.5. THE EGMS *CALIBRATED* PRODUCT 15
3.6. THE EGMS *ORTHO* PRODUCT 16
3.7. IMPORTANT PRODUCT ATTRIBUTES 18

4. HOW BEST TO USE EGMS PRODUCTS 20

4.1. FIELDS OF APPLICATION OF EGMS PRODUCTS 20
4.2. LIMITATIONS 25

5. USE CASES 27

5.1. GEOHAZARDS 28
5.1.1. Landslides 28
5.1.2. Subsidence - Ground movements due to groundwater depletion 30
5.1.3. Subsidence - Ground movements due to groundwater level recharge in abandoned mines 32
5.1.4. Subsidence - Due to consolidation of organic layers/reclamations 33
5.1.5. Subsidence - Due to local geology and climate change on coastal sites 34
5.1.6. Volcanoes and volcanic-related deformation 35
5.2. CIVIL ENGINEERING & INFRASTRUCTURE 38
5.2.1. Buildings - Ground movements as a result of geothermal drilling 38
5.2.2. Linear and Critical Infrastructure - Detection of motion of the structure and surroundings 39
5.3. MINING AND OIL & GAS 41
5.3.1. Mining - Ground motion as a result of mining activities 41
5.3.2. Mining - Ground motion as a result of salt solution mining 43
5.3.3. Gas - Linear and seasonal trends in ground motion 44
5.4. CULTURAL HERITAGE 46
5.4.1. Venice 46

6. INSAR DEFINITIONS 47

7. TERMS OF USE 53

8. SUPPORT AND HELP DESK 53

ANNEX 54

FIGURES

Figure 1 Overview of the countries for which data and products are available in the EGMS 9
Figure 2 EGMS product overview and the main product characteristics 11
Figure 3 EGMS product flow for baseline analysis 13
Figure 4 Example of EGMS *Basic* product (City of Copenhagen - Denmark) 14
Figure 5 Comparison of *Basic* and *Calibrated* product (City of Kotka - Finland) 16
Figure 6 Example of an *Ortho* product – horizontal / East-West (left) and vertical / Up-Down (right) (City of Kiruna - Sweden) 17
Figure 7 Representation if Line-of-Sight displacement (left: ascending & right: descending) 19
Figure 8 Overview map of the use cases locations presented in the following sections 27
Figure 9 *Ortho* product for French Alps in horizontal / East-West direction 28
Figure 10 *Ortho* product for French Alps in vertical / Up-Down direction 29
Figure 11 Comparison between ascending (left) & descending (right) *Basic* product in Almuñécar 29
Figure 12 Comparison between East-West (left) & Up-Down (right) *Ortho* product in Almuñécar 30
Figure 13 Continuous subsidence caused by excessive water extraction for agriculture in the Guadalentín Valley, Murcia 31
Figure 14 Increased water level in former coal mines led to significant uplifts in Freyming-Merlebach 32
Figure 15 Average time series for *Ortho* products in Freyming-Merlebach (top: vertical / Up-Down direction & middle/bottom: horizontal / East-West direction) 33
Figure 16 Subsidence processes over Maccarese peatlands in *Ortho* product (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down) 34
Figure 17 Port of Thyborøn with *Ortho* products (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down) 35
Figure 18 *Ortho* products at Campi Flegrei with strong uplift process (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down) 36
Figure 19 *Basic* and *Ortho* product of Mount Vesuvius with long term subsidence (left: ascending & right: vertical / Up-Down) 37
Figure 20 Uplift processes visible in *Basic* (ascending & descending orbit) in the city of Staufen im Breisgau 38
Figure 21 Westward shift in horizontal (left) and uplift in vertical (right) *Ortho* product for the city of Staufen im Breisgau 39
Figure 22 Port of Antwerp with vertical / Up-Down *Ortho* product 40
Figure 23 Mining related ground motions at USSB (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down) 41
Figure 24 Mining related ground motions at Malmberget/Gällivare (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down) 42
Figure 25 *Basic* product for Veendam (Netherlands) ground deformation due to salt solution mining (left: ascending & right: descending) 43
Figure 26 *Ortho* product for Veendam (Netherlands) ground deformation due to salt solution mining (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down) 44
Figure 27 Groningen gas field with *Ortho* products (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down) 45
Figure 28 Plots for *Ortho* products over UGS Norg in southwest of Groningen 45
Figure 29 Vertical / Up-Down *Ortho* product for Venice (Italy) 46
Figure 30 Average time series for Vertical / Up-Down *Ortho* product for Venice (Italy) 46
Figure 31 Accuracy vs. precision (from http://www.antarcticglaciers.org) 47
Figure 32 a) All modern satellite SAR sensors orbit the Earth in a near-polar orbit. b) By combining the rotation of the Earth and the orbital paths of the satellites, the entire surface of the Earth is illuminated by two different satellite geometries. When the satellite travels in a descending orbit (from north to south), it views a target area looking westward (in right-looking mode), while during its ascending orbit, that is, when it moves from south back to the north, it views the same target area looking eastward 48

Figure 33 Image acquisition geometry of Sentinel-1 48
Figure 34 Example EGMS velocity colour-map 49
Figure 35 SAR amplitude image acquired over the Vesuvius volcano. Studying a range line passing through the volcanic edifice (section A-A') shows pixels affected by foreshortening, layover, and shadowing, as well as areas with low reflectivity values along the slides facing away from the sensor 50
Figure 36 Example InSAR time-series plot. Each point relates to a SAR acquisition and all together they reveal the overall evolution of motion for that measurement point during the time period spanned by the dataset under analysis 52

TABLES

Table 1 Reference Documents 8
Table 2 EGMS product specifications and requirements 11
Table 3 Possible applications of EGMS products for Geohazards 54
Table 4 Possible applications of EGMS products for Civil Engineering & Infrastructure 54
Table 5 Possible applications of EGMS products for Energy & Natural Resources 56
Table 6 Possible applications of EGMS products for Cultural Heritage 56

ABBREVIATIONS

CLC	CORINE Land Cover
CLMS	Copernicus Land Monitoring Service
CRS	Coordinate Reference System
DEM	Digital Elevation Model
DS	Distributed Scatterer
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
EEA	European Environment Agency
EGMS	European Ground Motion Service
ETRF2000	European Terrestrial Reference Frame 2000
ETRS89	European Terrestrial Reference System 89
EU	European Union
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IW	Interferometric Wide
LAEA	Lambert Azimuthal Equal Area
LOS	Line-of-Sight
MP	Measurement Point
PS	Persistent Scatterer
PUM	Product User Manual
RD	Related Document
RMSE	Root Mean Square Error
SCE	Copernicus Snow Cover Extent
STD	Standard Deviation
UK	United Kingdom
USCB	Upper Silesian Coal Basin
WAP	Wide Area Processing

1. INTRODUCTION

EGMS - the European Ground Motion Service – serves a wide user community and provides new and unique, calibrated, and harmonised ground deformation products at Pan-European level.

The definition phase for a European Ground Motion Service started in November 2016 and involved 13 Copernicus participating states. In a series of meetings user needs and requirements were consolidated, defined and subsequently specified in a white paper in September 2017. This document formed the basis for the European Commission to implement the EGMS in the framework of Copernicus. A product that is not bound by national borders was requested explicitly by the user community based on their specific needs.

The EGMS adds a new and unique European-wide geospatial layer to the Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) portfolio, enabling further value-adding through both public and private sector downstream applications. All 29 countries contributing to Copernicus and the United Kingdom (UK) are covered during the first end-to-end implementation and operation of the service. The newest add-on to the Copernicus Land Monitoring Service comprises continental-scale, homogeneous maps of ground motion in mm-per-year precision measuring ground and infrastructure displacements, including those caused by landslides, subsidence and tectonics. The products are generated by high volume and high performance Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)-processing of data from Copernicus' Sentinel-1 Earth observation mission, providing a new and innovative European geospatial dataset from which other value-added products and services can be derived. These are based on project-specific targets and the technical feasibility of both the data and its processing and implementation. A dedicated viewer and downloader give access to the products of EGMS on a free- and open-to-all policy.

The Product User Manual (PUM) gives an overview of the EGMS and provides all relevant information about its products and their potential usage to the user community. The PUM is the primary document that users are recommended to consult before using the product and enables users to understand and efficiently use the EGMS products. The PUM serves various user groups with InSAR knowledge and expertise and includes elements such as use cases and sections dedicated to the general public, experts, and InSAR experts:

- Chapter 2 answers basic questions about the product and its application
- Chapter 3 provides a product description and an introduction to the methodology followed to produce the products
- Chapter 4 presents possible EGMS applications and the strengths & limitations of the products
- Chapter 5 introduces some use cases to the users
- Chapter 6 presents basic terminology and explanations of InSAR
- Chapter 7 provides information about the terms of use
- Chapter 8 presents the EGMS help desk

The PUM will guide the user to the practical use of the various EGMS products, elaborating the utilisation of the data, informs about potential applications, and highlights the limitations of the data.

Interested users that are new to the topic of interferometric ground motion measurement or users with basic knowledge will find high level information about the methodology, the products and their use complemented with practical guidance in this manual. Expert users who require in-depth information or exhaustive theoretical and technical background information should consult the relevant EGMS reference documents listed in Chapter 1.1.

1.1. References and Related Documents

Table 1 Reference Documents

ID	Reference or Related Document	Date	ID	Source or Link/Location
RD1.	Algorithm Theoretical Basis	20/12/2021	EGMS-D3-ALG-SC1-2.0-006	EGMS ORIGINAL Consortium
RD2.	Product User Manual	15/10/2021	EGMS-D4-PUM-SC1-2.0-007	EGMS ORIGINAL Consortium
RD3.	End User Interface Manual	15/10/2021	EGMS-D5-UIM-SC1-2.0-008	EGMS ORIGINAL Consortium
RD4.	Product Description and Format Specification	20/12/2021	EGMS-D6-PDD-SC1-2.0-009	EGMS ORIGINAL Consortium
RD5.	Product Archive and Dissemination system description	20/12/2021	EGMS-D9-PADS-SC1-2.0-011	EGMS ORIGINAL Consortium
RD6.	Quality assurance and control report	03/05/2022	EGMS-D10.4-QCR-SC2--042	EGMS ORIGINAL Consortium
RD7.	User Uptake Plan	15/10/2021	EGMS-D14-UUP-SC1-8.0-016	EGMS ORIGINAL Consortium
RD8.	End User Requirements	15/10/2021	EGMS-D15-URD-SC1-8.0-017	EGMS ORIGINAL Consortium
RD9.	GNSS calibration report	20/12/2021	EGMS-D19.1-GCR-SC1-3.0-031	EGMS ORIGINAL Consortium

2. FREQUENTLY ASKED QUESTIONS

This section gives a first impression of the EGMS and answers basic but important questions concerning its implementation and characteristics.

What is EGMS?

EGMS is an acronym which stands for European Ground Motion Service, the latest component of the Copernicus Land Monitoring Service.

For what period does the service provide data and products?

Baseline from February 2015 to December 2020. Three annual updates are planned for 2021-2023.

Which areas and regions are covered by the data?

Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden & United Kingdom.



Figure 1 Overview of the countries for which data and products are available in the EGMS

What is the methodology or the approach behind the products?

The underlying methodology utilises mature and state-of-the-art techniques of SAR Interferometry specifically multi-interferogram techniques analysing time series of differential full-resolution Sentinel-1-based SAR interferograms to minimise noise related to different sources and to derive displacements over time and average velocities for individual Measurement Points (MPs). Refer to [RD1] to access detailed information on the InSAR approach.

What products are made available to the user?

- *Basic* - provides InSAR displacement data provided in the satellite Line-of-Sight (LOS), with annotated geo-localisation and quality measures per measurement point
- *Calibrated* - is considered the main EGMS product as it serves the needs of most users. It is fundamentally the same as the *Basic* product but enhanced by the InSAR MP displacement values

being referenced to model derived from Global Navigation Satellite System (GNSS) time-series data, thereby making the InSAR measurements absolute
- *Ortho* - exploits the discrete look-angles provided by the *Calibrated* product to derive two further layers; one of purely vertical displacements, the other of purely east-west displacements

A more detailed description of the products can be found in Chapter 3 and [RD4].

How to assess the quality of the individual products?

The quality evaluation of the products and a statistical evaluation of the achieved accuracies etc. are listed in [RD6]. The trustability of the products rely on the effective quality assurance procedures put in place by the EGMS with the implementation of both internal and external validation protocols under the coordination of the European Environment Agency (EEA).

For which users are the products suitable?

The data are freely available to everyone who is interested in ground motion data and can be used for different purposes (see Chapter 5 of this document). Moreover, the products of the EGMS are suitable for users who wants to access precise measurements of ground motion such as e.g. engineers, local authority planners/developers, insurers, etc. An overview of expected users of the Service is provided in [RD7].

Where are the limitations in the data sets and the applicability of the products?

The products of the EGMS can be used in many different ways, but there are also limitations and restrictions in their application and usability, as described in Chapter 4.

What are the minimum requirements for the user to work with EGMS?

Only a device with an Internet connection is required. The data can be accessed directly via laptops, PCs, cell phones or tablets.

How do I get access to the products?

EGMS products are provided via the dedicated Dissemination & Archive System. Through this viewer and download interface, it is possible to both visualise and download the data. A detailed introduction of the portal and explanation of its use can be found in [RD3].

Are the data and products also available for download?

The *Calibrated* product is determined as the main EGMS [RD4] product and therefore of main interest to the common user community. Together with the *Ortho* product the *Calibrated* product can be retrieved in the WebGIS viewer, as well as downloaded from archive, while the *Basic* product is only available via the archive facility of the EGMS dissemination system. The use and functions of the download interface are explained in [RD5].

What are the costs for usage and download?

The land monitoring products and services are made available through the CLMS website on a principle of full, open and free access (ref. Privacy policy and terms of use and Chapter 6). Search and download functionality will be available through the Product Archive, and will require user registration. The authorisation system is based on the EU Login, while registration occur on the main Copernicus land portal.

Where can I get help or support if problems occur or users have questions?

In case of any problems or questions with the EGMS products or viewer, the user can reach the Copernicus Land Monitoring Service helpdesk. More information is given in Chapter 8 of this document.

3. PRODUCT DESCRIPTION

The following sections will briefly explain the production workflow and the main characteristics of EGMS products. For a detailed insight into the technical background of the products the interested user should refer to the documents [RD1] and [RD4]. An overview of the EGMS products and their characteristics is shown in Figure 2 below. Each product is presented in Chapters 3.4, 3.5 and 3.6.

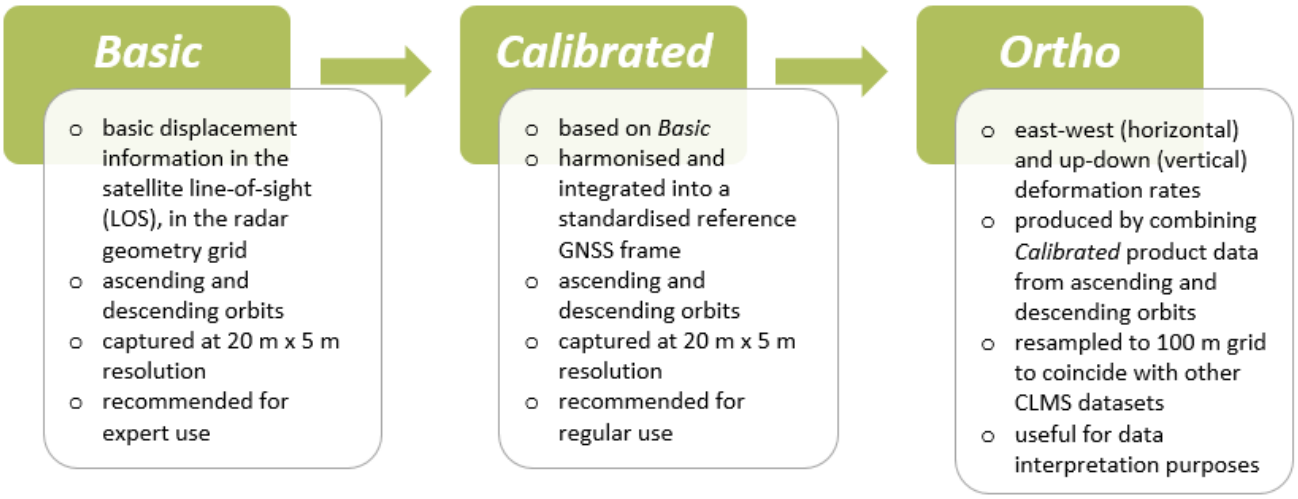


Figure 2 EGMS product overview and the main product characteristics

3.1. Product Quality Control

Each of the EGMS products has undergone an extensive quality control protocol in order to generate the best possible results. For this purpose, a variety of criteria were examined, including in addition to format demands [RD4], e.g. sufficient point density in selected CORINE Land Cover 18 (CLC) classes as well as other requirements listed in Table 2 below followed by a brief description of each quality parameter.

Table 2 EGMS product specifications and requirements

Specifications	*Basic*	*Calibrated*	*Ortho*
3D Geolocation accuracy	<10m	<10m	<10m
Mean velocity STD	0.7 mm/yr	0.7 mm/yr	0.7 mm/yr
Displacement STD	4 mm	8mm	8mm
Measurement Density	CORINE Land Cover 18: Class 1.1.1 > 5000 MP/km² Class 1.1.2 > 1000 MP/km² Class 1.2 > 1000 MP/km² Class 3.3 > 100 MP/km²	The same as *Basic*	Reduced due to resampling

3D Geolocation accuracy

SAR interferometry is able to determine the corrections to be applied to the reference Digital Elevation Model (DEM) in order to reconstruct the 3D position of the observed targets. As for displacement information this correction is relative.

In order to avoid bias in the geolocation, a common procedure was adopted to anchor the to the *a priori* digital elevation model: Copernicus GLO-30 DEM. It was assumed that the elevation of most MPs differ minimally from the reference DEM, and the common mode was removed from the elevation correction before geocoding.

Mean velocity standard deviation (STD)

After compensating atmospheric effects, the mean velocity is calculated for each MP from the time series of displacements based on a linear model with a corresponding estimation of the standard deviation of the mean velocities over the time series. Mean velocity STD is represented in the LOS for *Basic* and *Calibrated* products and along the horizontal (east-west) and vertical (up-down) components for *Ortho* product.

Displacement standard deviation (STD)

The displacement of an MP between the individual acquisition dates is the fundamental information characterizing the behavior of the MPs over time. It is calculated and recorded in a time series for each MP and represented in Line-of-Sight for product levels *Basic* and *Calibrated* and decomposed in vertical and East-West components for *Ortho* products. The corresponding standard deviation of displacements in the time series is estimated and provided in the metadata.

Measurement Density

A comparison of the measurement density for the *Basic* product against different CORINE Land Cover 18 classes represents another significant quality feature to evaluate the products quality. Separate quality checks for the *Calibrated* products are not required since this product is derived from the *Basic* product without affecting the MP position and therefore the MP density.

CLC is a standardised and harmonised land cover and land use dataset across Europe. Since the beginning of the 1990s, the entire European land surface has been classified into a variety of land use classes, regularly updated and made freely available to the user. Further information can be found in [RD1] and at: https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018

EGMS products are validated high quality products. That means MPs are reliable and can even be assessed by annotated quality indicators, such as temporal coherence and RMSE. Even though the density of points might decrease over specific land cover classes or specific structures, all MPs found in EGMS products in these areas are representative and can be regarded as similar to “ground truth”.

3.2. Production Methodology

The overall objective of EGMS is to provide Pan-European, consistent and harmonised, ground deformation measurements derived from the complete satellite data archive of the European Sentinel-1 mission and generated with mature and state-of-the-art interferometric techniques. Using all available and relevant Sentinel-1 acquisitions with precise orbits, data processing is performed on defined processing units to achieve maximum efficiency, accuracy and precision of the deformation measurements [RD1].

The analysis is covering the period from February 2015 to December 2020 in the first baseline analysis, with three consecutive annual updates that are foreseen.

Generation of the EGMS baseline and updates will follow the basic stages logic symbolised by Figure 3 below. The reader will find detailed information about data processing in [RD1].

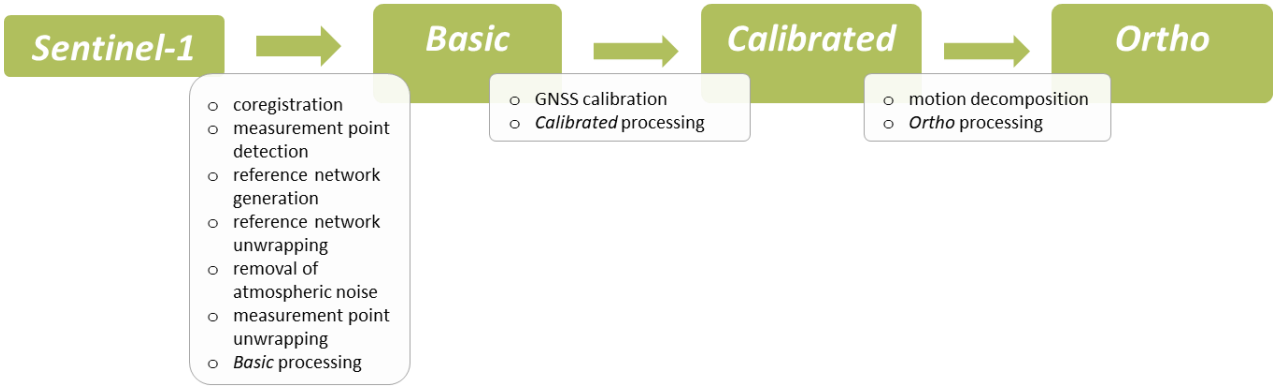


Figure 3 EGMS product flow for baseline analysis

Due to an accurate calibration process EGMS *Calibrated* represents a unique reference dataset, available at European level and comparable across national borders [RD1]. To achieve this, thousands of individual overlapping *Basic* products were harmonised and integrated into a standardised reference frame by using a velocity model derived from GNSS network measurements as an absolute referencing of large-scale deformation processes [RD9].

3.3. Satellite Data Input

EGMS utilises a vast data basis of radar images comprising Level-1 SLC data products acquired by the two twin satellites Sentinel-1A and Sentinel-1B. Each satellite platform carries a Synthetic Aperture Radar operating at C-band, i.e., a wavelength of approx. 5.5 cm (5.405 GHz). In the Interferometric Wide (IW) swath mode, which is the main acquisition mode over land, data is acquired at a spatial resolution of 20 m in azimuth and 5 m in range (single look). IW mode acquires three sub-swaths per image, with each sub-swath composed of a series of 9 bursts stacked in the azimuth direction. Each burst is approximately 80 Km (range) per 20 Km (azimuth), resulting in an overall 250 Km by 180 km image.

Snow-cover can compromise the quality of InSAR results by increasing the noise of time series. Snow-cover is a factor either seasonally or quasi-permanently at high latitudes and over mountain regions, e.g. the Alps, parts of Scandinavia, Iceland. To produce reliable InSAR coverage and filter out images with extensive snow coverage, it is sometimes required to use prior information such as the Copernicus Snow Cover Extent (SCE) product. For example, time series over Norway will contain only images acquired between May/June and October.

The availability of an earthquake catalogue of European events can allow the selection of appropriate processing strategies to deal with such events. In particular, the processing and quality parameters have been adapted in areas where strong earthquakes have been recorded (e.g. central Italy earthquake sequence in 2016-2017). More information is available in [RD1].

3.4. The EGMS *Basic* product

Product overview:

- The deformation data are accurate, reliable and representative, nevertheless interpretation of these is feasible for local phenomena only due to the representation of displacement information in the satellite LOS.

- Measurement point density is high, especially in urban areas. The number of MPs can be reduced where large areas are to be analysed. This can be achieved using Geographic Information System (GIS) operations on product attributes (e.g. coherence threshold) without degrading quality.
- In terms of time series the *Basic* products are temporally sampled at a 6 day cycle using two satellites (Sentinel-1A and 1B) from April 2016 onwards and 12 days before Apr. 2016. From December 2021 the temporal sampling is again 12 days due to the loss of contact with Sentinel-1B.

The EGMS *Basic* product provides InSAR displacement data in the satellite LOS, with annotated geolocalisation and quality measures per measurement point. Satellite LOS means that measurements are projected along the imaginary line which connects the satellite to the target.

The product is provided as a 2D map of InSAR measurement points, colour-coded by average velocity. A time series plot is associated with each point.

Significantly, *Basic* products are spatially referenced to a virtual reference point, whose time series is derived by a statistical analysis of the dataset. As a consequence, the provided measurements are meaningful just considering the processed area. It is not possible to compare deformations from adjacent areas belonging to different tiles of the same product. The time series are temporally referenced to the value of the deformation model at time T_0=0. Please refer to [RD1] for a description of the reference point rationale.

EGMS *Basic* is provided as two discrete datasets; one made from the SAR data acquired orthogonal to the satellite ascending trajectory (south to north), the other from data acquired orthogonal to the descending trajectory (north to south).

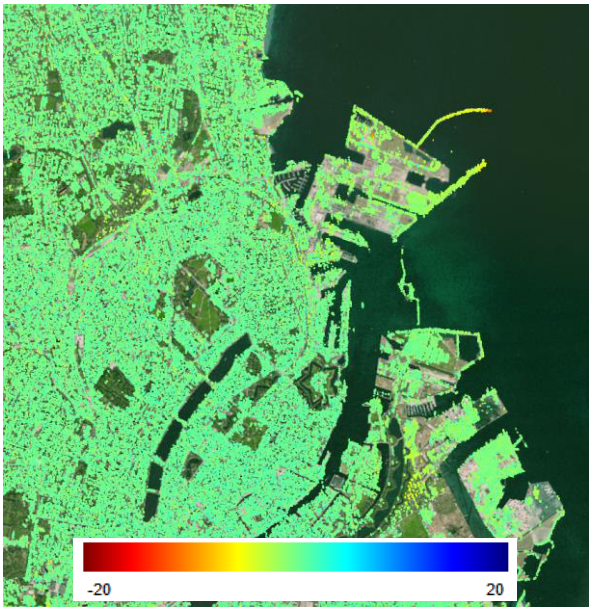


Figure 4 Example of EGMS *Basic* product (City of Copenhagen - Denmark)

The product itself can be regarded by the user as a base product that provides accurate deformation information at a high level of detail or maximum measurement density. It is considered for expert usage and shall be evaluated with appropriate expertise, tools and potentially auxiliary data.

3.5. The EGMS *Calibrated* product

Product overview:

- Analogous to EGMS *Basic*, all products are generated at the highest possible spatial resolution and contain the full Line-of-Sight deformation history.
- *Calibrated* products comprise displacement time series and metadata.
- Displacement values of *Basic* and *Calibrated* time series differ by the magnitude of the components compensated by the calibration process. Differences represent the effect of low pass trends (e.g. glacial rebound) on the MP deformation.
- Prior to April 2016 the temporal sampling is every 12 days. From April 2016 onwards the temporal sampling is every 6 days. From December 2021 the temporal sampling is again 12 days due to the loss of contact with Sentinel-1B.
- Differently from EGMS *Basic*, deformation measurements are calibrated, therefore absolutely referenced and consistent across space and time.
- Analysis of deformation data in areas with events such as earthquakes need special attention, since single measurements or single products could eventually render an induced deformation phenomenon inappropriately, e.g. due to a heavy displacement. A comparison of multiple *Basic* or *Calibrated* products of different acquisition geometries is mandatory in that case. A record of significant earthquake events affecting various GNSS networks is systematically maintained by the GNSS community.

The EGMS *Calibrated* product is considered the main EGMS product as it serves the needs of most users. It is fundamentally the same as the *Basic* product but enhanced by the InSAR MP displacement values being referenced to model derived from GNSS time-series data, thereby making the InSAR measurements **absolute** (with reference to an Earth centred reference frame). *Calibrated* products overcome the intrinsic limits of the *Basic* ones, hence making it possible to compare deformations from adjacent areas belonging to different products of the same level. The harmonization process makes all EGMS *Calibrated* components equivalent and comparable at common spatial (above 50 km) and temporal (mean velocity) scales by removing low-pass components e.g. tectonically induced trends. EGMS *Calibrated* combines the features of the underlying *Basic* product with the accuracy and consistency of existing geodetic networks. Therefore, the technical characteristics of EGMS *Basic* are valid for EGMS *Calibrated* as well.

As with *Basic* products, the *Calibrated* product is provided as two discrete datasets, one in ascending geometry, the other in descending geometry.

Some isolated islands and the oversea departments and regions of France may not have GNSS data available. For these areas, *Calibrated* products are produced by harmonizing *Basic* products with respect to each other, and then adjusting the mean ground velocity to zero. Measurements of any displacements on such islands are not referenced against the GNSS-derived datum, but to a local reference point.

Compared to the *Basic* product shown on the left side of Figure 5, a change in the velocity values due to the inclusion of the GNSS signal is notable by the change in colour of multiple MPs of the *Calibrated* product on the right side. The reason for this is a glacial rebound by ~+2 mm/yr at city of Kotka.

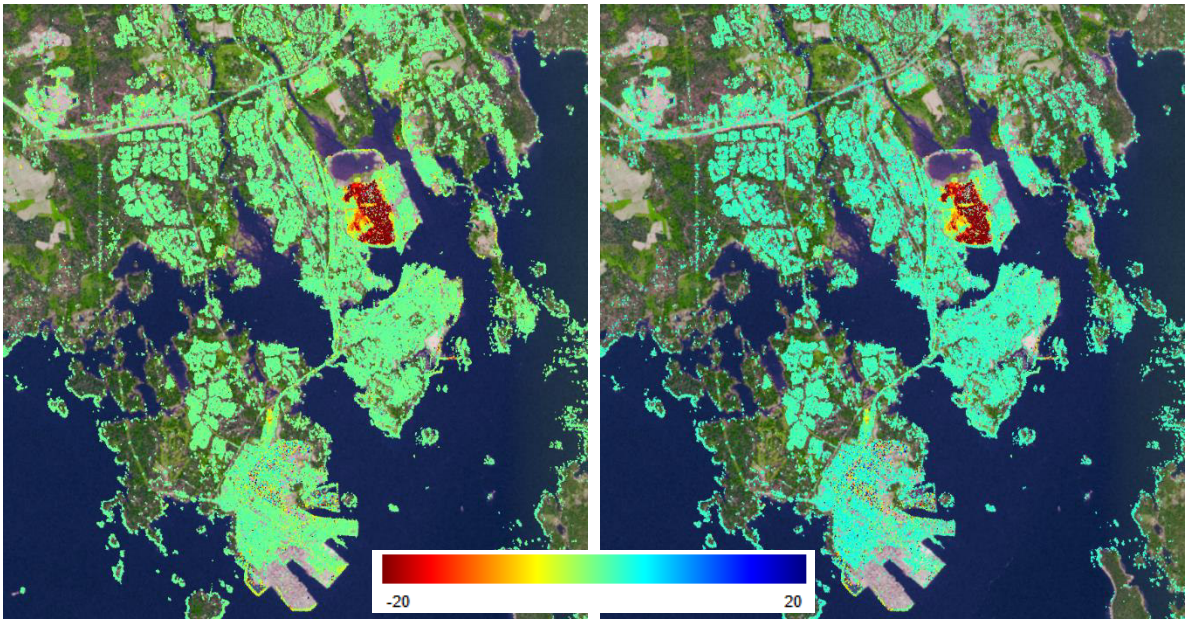


Figure 5 Comparison of *Basic* and *Calibrated* product (City of Kotka - Finland)

3.6. The EGMS *Ortho* product

Product overview:

- The data product is provided as two separate data layers containing respectively purely vertical and purely east-west displacements.
- It's represented in 100 m x 100 m output resolution cells to provide robustness plus reliability and match other existing CLMS datasets.
- Allows an analysis of displacement and deformation phenomena of the earth surface independent of the radar look geometry.
- The horizontal component of the *Ortho* product reflects displacements in just east-west direction due to the SAR acquisition geometry along a polar orbit which leads to a lesser sensitivity of the measurement of motion in north-south direction. EGMS processing compensates the north-south component of motion through the calibration with GNSS data.

EGMS *Ortho*, see an example in Figure 6, is a unique geospatial dataset of absolute displacement measurements, anchored to a common GNSS framework. The product exploits the discrete look-angles provided by the *Calibrated* product to derive two further layers; one of purely vertical displacements, the other of purely east-west displacements. Both layers are resampled to a 100 m grid comparable with other CLMS products. Vertical and east-west displacement components can be estimated taking advantage of the prior information coming from GNSS data. Refer to RD1 for more details about the *Ortho* products generation process.

The main benefit of *Ortho* products is ease of understanding to those new to InSAR as the data-acquisition geometry need not be considered. However, such *decomposed* data can still prove valuable even to InSAR experts when considering phenomena that might include non-vertical displacements such as those relating to tectonics or landslides.

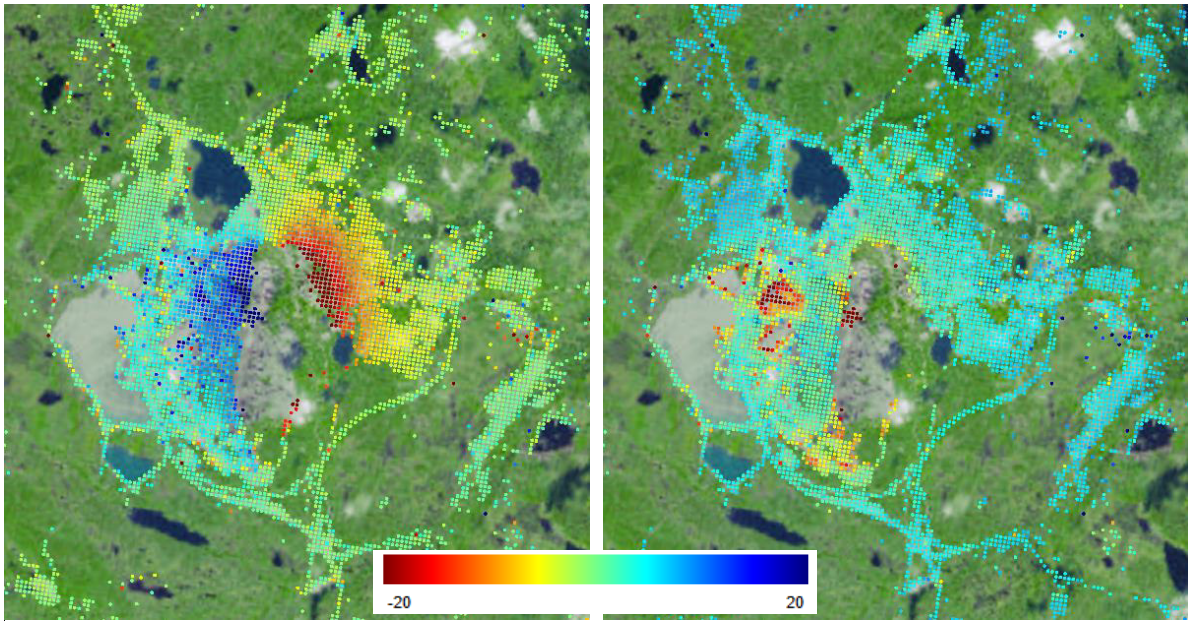


Figure 6 Example of an *Ortho* product – horizontal / East-West (left) and vertical / Up-Down (right) (City of Kiruna - Sweden)

The information given by the *Ortho* product is easier to understand by the end-user compared to *Basic* or *Calibrated*, due to the representation of surface motion and displacement in a standard coordinate system – independent of the inherent satellite geometry. *Ortho* products are consistent across all tracks and, in addition, the east-west and up-down velocities can be recombined to produce a true movement direction vector within an east-west or vertical plane, which is essential to understand specific types of real world deformation phenomena, e.g. landslides. *Ortho* will be the product the users will see first when opening the EGMS viewer.

Peculiarities of EGMS *Ortho*:

- **Spatial sampling:** The ascending and descending *Calibrated* products that make the *Ortho* product have different acquisition geometries, meaning that the distribution of MPs is not identical between the two datasets. To ensure that both datasets represent the same area of ground, the data is averaged to a common 100 m grid, this particular spacing chosen to coincide with other CLMS services and it is a good compromise between resolution and spatial coverage of the database.

- **Coverage:** To make the *Ortho* product, *both* ascending *and* descending geometry *Calibrated* products are needed. In some areas of high topographic relief, the usual geometric artefacts associated with radar remote sensing (layover, foreshortening and shadow – see chapter 6) prevent 100% coverage. In such areas, there are no EGMS *Ortho* measurements.

- **Not full-3D:** Each Sentinel-1 satellite is near-polar-orbiting with a side-looking radar. The echoes of the SAR instrument consequently become less sensitive as the direction of any ground displacement approaches that of the satellite flightpath, i.e., north-south. Importantly, any ground movements in these directions will not be measured directly by InSAR but reintroduced from the GNSS data (please refer to [RD1]). In fact, north-south displacement components are not available for any MP, since they are estimated from GNSS data, characterized by a much lower spatial resolution than InSAR measurements. Therefore, vertical, and east-west components are estimated thanks to a spatial interpolation of the information available. This approach, however, does not introduce a significant

bias in the measurements, apart from area affected by strong spatial variations of north-south displacements.

- **Temporal sampling:** In general, the temporal sampling of the satellite tracks contributing to the *Ortho* product is not aligned. This happens because *Calibrated* products, from which *Ortho* are derived, exhibit acquisition patterns shifted in times on a track basis. Moreover, there may be holes in the datasets (e.g., missed acquisition, especially in 2015). In order to define a common temporal grid, for the baseline all time-series will start on January 2016 and end on December 2021, with regular six-day temporal sampling with origin on 3-April-2014 (launch date of S1A). A regular sampling will be maintained whenever possible, even if, in correspondence of huge gaps in the *Calibrated* products time series used to generate the *Ortho* level, customized solutions may be adopted. Please refer to document [RD1] for further details on *Ortho* product generation.

3.7. Important Product Attributes

All available products are provided together with a variety of attributes. This information is indispensable for the evaluation of the quality and uncertainties of the EGMS products and assists the user in understanding and analysing the products. All essential attributes are shown below together with a practical explanation of their meaning and use. For a detailed description of all attributes per product the reader should refer to [RD4].

MP Type

Provides the user with information on whether the ground motion was derived from a persistent / point scatterer or a distributed scatterer extending to the area provided in this attribute in m^2 (0 means point-like scatterer, > 0 distributed scatterer respective area of the DS).

This attribute is available for *Basic* and *Calibrated* products.

Temporal Coherence

Indicates the stability of the reflection characteristics associated with the MP over the time series. It therefore represents a measure of quality or reliability of the measurement. For the EGMS *Ortho* product, the temporal coherence results from the average coherence of the input MPs of one grid cell. In general coherence is calculated in terms of the correlation coefficient given in the range 0 to 1. High coherence with values close to 1 indicates high stability and reliability, whereas stability and reliability degenerates with coherence values lower than 0.5. Pixels with low coherence values are usually excluded from data processing. The user can regard this attribute as a quality measure allowing the user to filter the products according to the coherence values, e.g., analysing and visualising only MPs with a coherence of ≥ 0.8.

This attribute is available for *Basic* and *Calibrated* products.

RMSE (Root Mean Square Error)

Residual error or variation of the displacement over the time series in *mm*. It represents a measure of the precision of the displacement.

This attribute is available for *Basic*, *Calibrated* and *Ortho* products.

Mean Velocity

It describes the mean velocity of the MP without acceleration or seasonal trends measured in the temporal frame of the time series. Velocity is calculated along in the LOS for EGMS *Basic* and *Calibrated*; this means that the motion can realise towards the satellite or away from it. Therefore, positive values for mean velocity

indicate a movement towards (e.g. uplift) and negative values a movement away (e.g. subsidence) from the sensor (see Figure 7). The LOS velocity for EGMS *Ortho* represents the motion in the vertical or east-west directions.

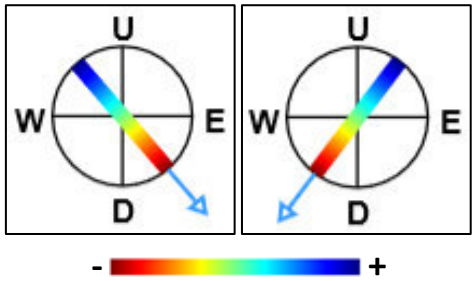


Figure 7 Representation if Line-of-Sight displacement (left: ascending & right: descending)

This attribute is available for *Basic*, *Calibrated* and *Ortho* products.

Seasonality

Characterises the magnitude of seasonal displacement over the period of one year. The seasonal oscillation is a sinusoidal signal in the displacement time series that results from cyclic processes over the year. It can be related to e.g. rainfalls or temperature variations between winter and summer. The magnitude of this oscillation, recorded here for an MP, is dependent on the characteristics of the surface or the object and its response to temperature variation. In realistic scenarios values for the seasonality of an MP are found in the range between 5 mm and 10 mm.

Available for *Basic*, *Calibrated* and *Ortho* product.

Time-series

This attribute describes the displacement or ground deformation of an MP related to the primary image as the zero-point for each SAR acquisition date. A record of the complete displacement history for each MP over the temporal sampling period is provided here. From the displacement history, all effects over the time span, e.g. seasonal signal, linear trend or acceleration from a given date on, can be visualised and statistically derived. The data itself is temporally referenced to the primary acquisition in the stack and spatially referenced to a reference point (*Basic*), or the reference GNSS network (*Calibrated* and O*rtho*). The data record can be utilised to describe or separate effects over time. The mean velocity of an MP or an ensemble of MPs gives a linear trend of the surface motion and lets the user identify spatial patterns of similar trends and the strength of surface motion. Superimposed higher order effects, e.g. acceleration (2nd order) or a seasonal (periodic) signal in the time series can then be separated.

Available for *Basic*, *Calibrated* and *Ortho* product.

4. HOW BEST TO USE EGMS PRODUCTS

All EGMS products serve a variety of applications. Basically, all of them deal with dynamic processes versus nearly stable conditions of the earth's surface on different scales. The EGMS represents a new and unique source of data, valid as ***reference information*** since:

- Calibration of displacement data to a standard geodetic reference frame results in a harmonised and consistent data product.
- Even on a Pan-European scale data are coherent with a comparably dense MP distribution for similar surface types, consistent across European regions and national borders.
- Provision of a densified Pan-European GNSS data model as a by-product of EGMS ensuring the traceability of deformation patterns and separability of superimposed deformation signals. The GNSS model is a value added product compiling available geodetic networks, e.g., EUREF, NGL, etc.
- EGMS provides validated products that undergo in-depth and independent validation. For details of the validation concept, see https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/validation-approach-of-the-egms-product-portfolio. The external validation process will be completed at the end of 2022.

According to these features users are able to reference their individual deformation studies or investigation to EGMS, validate their processing results or even compare in-situ findings with EGMS information and products.

4.1. Fields of application of EGMS products

Besides the characterisation as a baseline dataset, EGMS products provide a unique data source as is for the user community. Since all products are validated the information can be used for the analysis of dynamic phenomena and their evolution, e.g. subsidence patterns due to changes in groundwater production, or for estimating ongoing deformation of single targets e.g. infrastructures. For an analysis of the spatial features of surface motion, such as areas or clusters of points with comparable motion trends, deformation patterns can be identified according to the **mean velocity** or the seasonal components. This allows any user to indicate areas with significant motion or displacement of interest and therefore trigger further evaluation of the indicated phenomenon by analysing the complete temporal history of the MPs, utilising when needed other high/very high resolution products or other sources of displacement data (e.g. in situ instruments).

Thanks to the relatively long **time series of terrain displacement** recordings in all EGMS products, temporal characteristics and patterns, such as linear subsidence, or specific phenomena, such as accelerated subsidence linked to underground construction works, are detectable. The accessibility of different temporal displacements allows the user to address specific problems, such as geohazards studies by tracing the evolution of the deformation or projecting trend analyses based on the displacement history.

In the following, a brief overview of the areas of application is presented, for which the products from the EGMS are suitable on different levels for investigations and where the specific main purpose to the user is. An estimate of the potential user groups interested in the EGMS products for each application is given in the Annex.

Suitable	
Possibly Suitable	
Partly Suitable	
Not Suitable	

Geohazards

Subsidence

Natural Subsidence
- Consolidation
- Suberosion in karst and salt domes

Anthropogenic
- Groundwater fluctuations & exploitation
- Urbanization

Basic
Calibrated
Ortho



The type, characteristics and intensity of ground movements are closely related to geological and hydrogeological conditions. The interpretation of the EGMS data depends on the scale, quality and completeness of ancillary data and measurements. For example, ground water time series can be compared to EGMS time series to link groundwater exploitation and motion recorded.

Landslides

- Identification of potentially risky and/or critical areas
- Mapping of new landslides or other types of slope dynamics
- Monitoring of state of activity
- Improved natural hazard risk mapping for urban planning and civil protection purpose
- Update landslide database, catalogues and geological maps

Basic
Calibrated
Ortho



Double orbit analysis, decomposition of vertical and horizontal displacement and Integration of DEM-based topographic analysis are necessary. Major events (landslide collapses) often result in low coherence and might not be detected. Not all landslide types can be measured, and the motion rate must be smaller than 2 mm/day. The MP coverage on the landslide body depends on land cover and geometric effects.

Tectonics

- Identification of large area tectonic motion

Basic
Calibrated
Ortho



Suitability to monitor wide area ground movements, strain at faults, and support to identify and quantify differential movement across tectonic boundaries and therefore improving understanding of large-scale tectonic deformation. The EGMS products cannot be used for forecasting earthquakes.

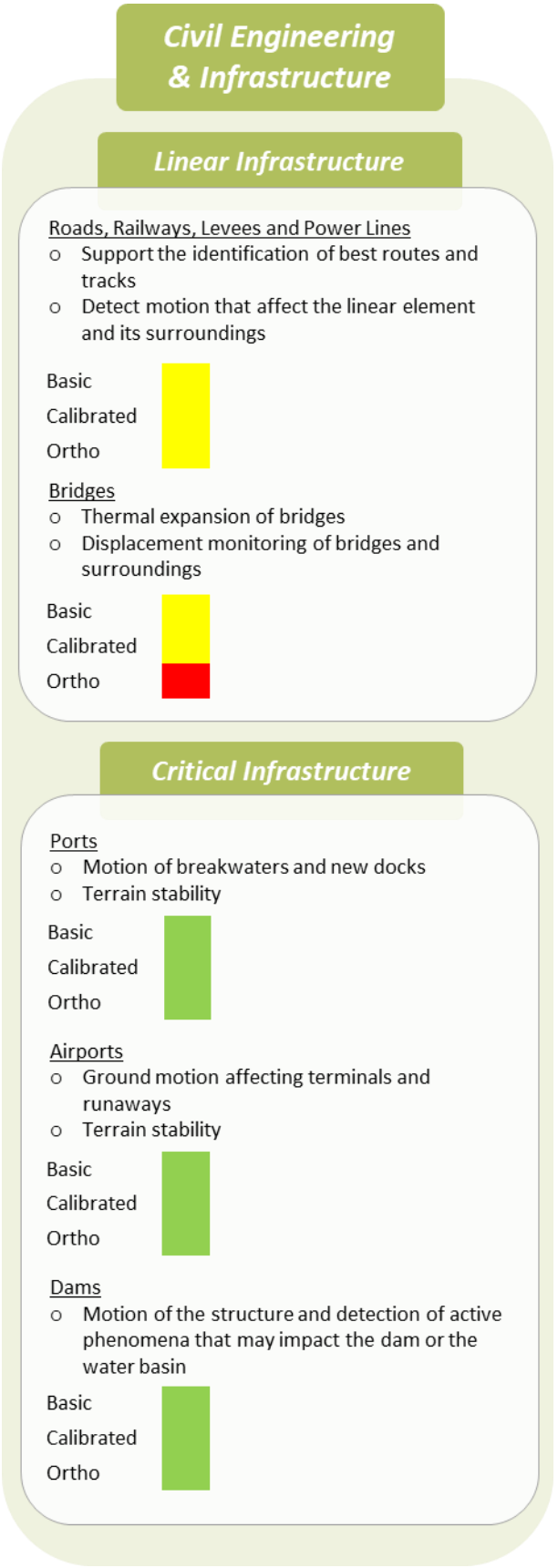
Volcanoes

- Monitoring of volcanoes (e.g. inflation/ deflation)

Basic
Calibrated
Ortho



Baseline data useful for assessing the status of a volcanic area. Suitability to detect deformation of the volcanic edifice prior to an eruption or after an eruption. EGMS data cannot be used as sin-eruption tools or to monitor active lava flows.



EGMS products are a baseline for the investigation of active movements along linear infrastructure and in their surroundings. EGMS can offer an overview of active phenomena that may endanger and damage an infrastructure. They can also offer information about the stability of single elements through few but reliable MPs. EGMS is not providing data for structural investigations and may be not accurate enough for specific and single elements appraisals. Detailed scale analysis may require the processing of very high resolution images. The suitability of the *Ortho* product depends on the type of analysis. If individual elements are under consideration, it is not suitable, but if, in turn, the movement in the area around these elements is investigated, the *Ortho* product could possibly be suitable as well.

The detectability of ground movements is dependent on the size of the single structure and on the presence of nearby constructions which may interfere the receiving signal. The EGMS will provide a baseline and will facilitate the monitoring of urban areas and critical infrastructure like nuclear power plants, chemical storage or refineries or water gas and power distribution facilities. For example they can be used to detect subsidence affecting airport runways or breakwaters in ports. EGMS data may be used to assess the presence of differential displacements but are not a tool for detailed structural investigations. Point density and accuracy may not be enough for specific users and applications.

The EGMS products are excellent to monitor the surroundings of a critical infrastructure. For example, they can be profitably used to detect active landslides that may interfere with dam basins.

Civil Engineering & Infrastructure

Buildings

- Monitoring of the structure and surroundings
- Possible detection of differential displacement
- Terrain stability

Basic
Calibrated
Ortho



Engineering

- Monitoring of dewatering processes
- Tunneling & earthworks
- Monitoring of the structure and surroundings
- Possible detection of differential displacement
- Terrain stability

Basic
Calibrated
Ortho



The EGMS products can be used to detect the effects of engineering works of various type, such as dewatering for foundation excavation or tunnelling.

Time series can be used to evaluate the effect of engineering works over time and as deferred time monitoring tools.

The EGMS data cannot follow in real time any kind of engineering operation and has limitations in vegetated areas and may not be accurate enough for the structural assessment of single structures affected by the motion induced by engineering work.

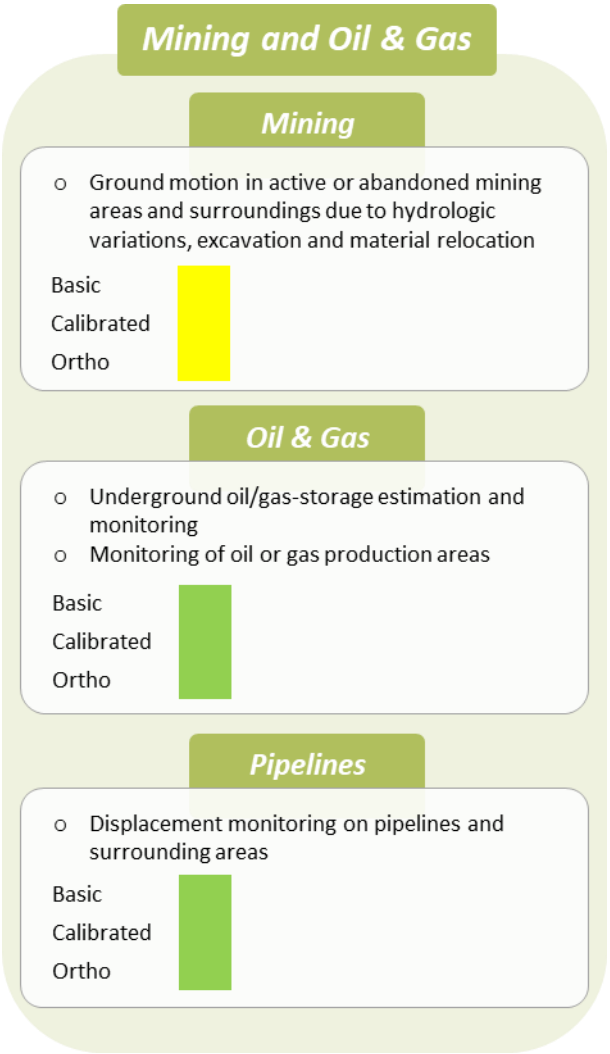
Cultural Heritage

- Monitoring and mapping ground motion in cultural heritage areas and UNESCO sites

Basic
Calibrated
Ortho



Suitability to detect ground motion in cultural heritage sites and provide valuable information for heritage management and protection. The EGMS is optimized for urban heritages .



Suitability to detect ground motion induced by surface and sub-surface mining in active or abondoned mining sites. For example, subsidence due to subsurface coal excavation or assessment of residual motion in abandoned mining sites. Measurement points coverage is highly dependent on coherence loss for frequent surface changes (e.g. in open pit mines) or strong non-linear motion.

Suitability to detect ground movements related to gas and oil extraction and gas storage. Potential integration of the EGMS data in reservoir models.

Pipeline damage and leaking are usually caused as a result of ground movement. The EGMS gives valuable information about active movements along the track and in the surroundings of a pipeline. For subsurface pipelines the trajectory of the pipeline has to be known for association of encountered MP. EGMS is not suitable for investigating the structural integrity of the pipeline.

4.2. Limitations

The previous sections provided an overview of the applicability and the potential of the EGMS data for a wide variety of applications. Nevertheless, limitations exist for EGMS products which are inherent for interferometric techniques but essential to know for the user and need to be regarded before starting an analysis of the data, thereby preventing interested users new to the topic from incorrect or inadequate use. Main limitations result from:

Natural conditions of the earth's surface

On certain surfaces that are particularly characterised by a changeable texture or by the absence of strong reflectors, no information can be obtained since no MPs are detected, namely

- **Topography**: Slope and orientation of a mountain flank directly affect the radar imaging geometry that way that, at an extreme, no information can be retrieved in certain areas that are aligned to the SAR look direction (shadow or layover areas) and lead to a different coverage of MPs between orbits. This impact also the detectability of the motion between orbits.
- **Hydrosphere**: in general PS-Interferometry is not applicable here, due to surface motion (wind and waves). Therefore, applications like monitoring of water (rivers, lakes, and ocean) or measurement of surface motion, currents and direct sea level changes are not feasible.
- **Vegetation & crops**: Vegetation is characterised by its growth, changing appearance throughout the seasons or vegetation cycle. Besides the diffuse backscattering mechanism of vegetation layers, changes of the geometric state of vegetation (plant growth, motion due to wind, harvest, foliage, falling leaves, etc.) prevent the applicability of EGMS products in those areas. Applications such as measurement of plant/tree growth, terrain deformation monitoring under forest areas or grassland are not realistic. Topography often determines the vegetation state of the surface, e.g. appearing vegetation areas in increasing terrain heights and steepness of low mountain ranges in Europe are limited for EGMS due to a lack of detectable MPs. In higher and steeper regions, such as high alpine terrain, cragged and rocky features are dominant and the number of natural reflectors increases; therefore, there is a potential increase in MP density.
- **Coastal areas**: The coastal areas should be treated with care. Deformation measurements over temporally flooded areas, e.g. the tidal flat system of the Wadden Sea, is not feasible even though falling dry for a period of hours. In terms of sea level rise the landward subsidence rates measured by EGMS products along the coast are a significant information source for climate change studies or risk grading.
- **Snow cover**: A layer of snow is a disturbing entity for the applied processing technique and therefore periods with seasonal or perpetual snow cover are excluded in the time series. In addition to excluding snow from the input data used for the products, changing terrain elevations due to snow cover would also make long-term monitoring impossible. Therefore, the products cannot be used for snow- or ice-specific applications and analyses and are outside the scope of EGMS.

Methodological Constraints

Besides ground coverage, methodological constraints due to the sampling design, the processing concept or the acquisition system of the satellite set limitations on the use of the generated products. In brief limitations are due to

- Even in areas where no measurement points appear in the EGMS products, real or natural ground movements can still be present, which were not detected by the processing algorithm. This results from the inherent requirement of a coherent measurement in processing, excluding certain natural surface types (e.g. forest) where points cannot be detected.

- With the progress of EGMS over the upcoming years new reflectors and corner reflectors or targets will appear throughout the production area, e.g. due to finalised construction works. These reflectors will not appear as an MP in the EGMS products immediately with each new Sentinel-1 acquisition, due to the MP selection technique in PSI processing and is therefore depending on the updating approach of EGMS.
- Small scale and fast moving objects such as vehicles, trains, etc. are not sampled with the time series, excluded and not regarded in the process and in general not in the scope of the technique in use.
- The processing technique utilises an existing time series of past acquisitions and provides therefore a record of the displacement history of according MPs up to a certain date. It allows the user to backtrack deformation events or phenomena prior to the latest acquisition data of the product. Predictions are not feasible and out of scope of EGMS and its products itself. An integration of these products in modelling or analysis exercises, e.g. in volcanology observations needs to be performed by users with specific expertise and appropriate auxiliary data.
- The geolocation accuracy is quantified with a threshold value of <10m, see Table 2. Therefore, the localisation of a scatterer (determining the measurement point) is only possible in that range, so that an exact relation of the MP and the real reflecting object may not always be possible for single points. Instead, MPs in close physical proximity of an object can be related according to their spatial distribution and context. Considering the radar imaging geometry plus geolocation accuracy the topologic structure of the reflectors rendering the real object remains in the product. E.g. MPs detected along a series of lamp poles or over multiple window elements over a multi-storey façade of a building might appear shifted, but equidistantly distributed, in a PSI product.
- Even though the north-south component of motion is modelled and retrieved from GNSS for calibration, it is assumed that this component does not exist for decomposition of *Ortho* information. Since polar orbits are used with orthogonal look (aligned predominantly in east-west) direction, the technique is sensitive to motion parallel to east-west direction while the north-south direction is not determined.
- In general, the temporal sampling of the satellite tracks contributing to the *Ortho* product is not aligned. This happens because *Calibrated* products, from which the *Ortho* product is derived, exhibit acquisition patterns shifted in times on a track basis. Moreover, there may be holes in the datasets (e.g., missed acquisition, especially in 2015).
- With the failure in Sentinel-1Bs power system late December 2021 and subsequent fruitless recovery actions the Sentinel-1 system was and is still not able to acquire data in its full capacity and according to the acquisition plan, reducing the repetition rate over Europe from 6 days (with two satellites) to 12 days (with one satellite). The baseline product that covers the timeframe between 2015 and Dec 2020 is therefore not affected, the same holds for the first update until Dec 2021 where only few acquisitions are missing at the end of the time series. Updates utilising data after Dec 2021 can still be processed with the lower repetition rate, accounting for a lower coherence between the acquisitions. Finally, the period of reduced capacity (operating Sentinel-1A only) needs to be determined and the update method to be adapted to this restriction (length of input time series vs. lower repetition) – plus provision of a quantification of the effect on measurement accuracy and point density in the update products.
- In areas with strong or significant non-linear motion, measurements could be inaccurate and MP density decreased due to the loss of points in those areas. These effects are caused by a loss of coherence and discrepancies between real deformation and the (non-linear) motion model applied during processing. Therefore, maximum deformation rates for an area can be derived to provide an indication for the reliability of the measurements.

5. USE CASES

The products made available within EGMS have a wide range of possible applications in the most diverse fields of application. These use cases illustrate and describe classical examples of InSAR usage to facilitate the work of future EGMS users.

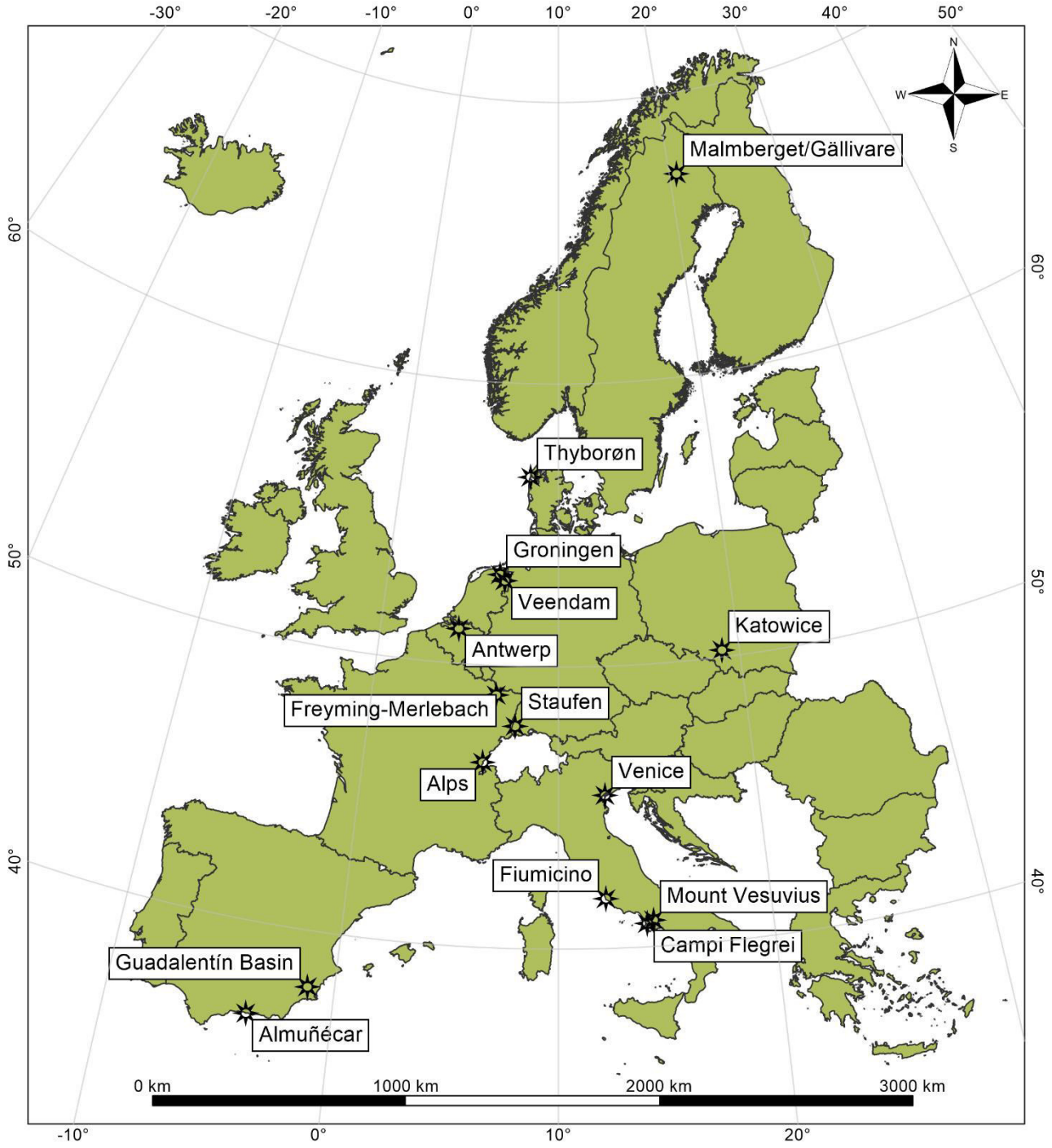


Figure 8 Overview map of the use cases locations presented in the following sections

5.1. Geohazards

5.1.1. Landslides

In the last decades, a significant increase in terms of quantity and magnitude of landslide events has been reported that caused damage or threatened society.

Available landslide inventories are a more or less accurate representation of the past landslide locations built upon spatially incomplete and positional inaccurate landslide information (Lima et al. 2021). Additional information on the spatial accuracy of events, their temporal occurrence and mapping uncertainties can further enhance the usability of inventory data. In traditional usage, the term landslide has been used to cover almost all forms of mass movement of rocks and regolith at the Earth's surface. Landslides occur when the slope (or a portion of it) undergoes some processes that change its condition from stable to unstable.

InSAR analysis at regional scale has been proven to be an efficient complementary tool to identify active slopes, which are probably potential landslides. InSAR data permits to determine factors like movement velocity, acceleration, age of movement (within the period covered by the InSAR time series) and geographic location. However, it shall be emphasised that conclusive classification of landslide types also requires knowledge or auxiliary information such as geological conditions, topographic information (slope, convexity, slope height, aspect, among others), climate, water saturation and cause of the movement. Especially the integration of ground displacement information of slopes and their temporal component are increasing the quality of landslide susceptibility maps and can be used also as source to monitor instable slopes.

Regarding the topographic or geometric fact that most of the landslides are characterised by vertical and horizontal motion, the combined usage of *Basic*/*Calibrated* and *Ortho* products enhance the detection accuracy and precision.

According to studies in the French Alps and the addressed landslides inventory EGMS products provide new information source to analyse and interpret landslides. For the studied areas in the French Alps, EGMS data show a consistent spatial characteristics and localisation with velocities in down direction between 5 mm/yr and 18 mm/yr. The horizontal motion of the landslides is in the range of 8 - 27 mm/yr in east direction.

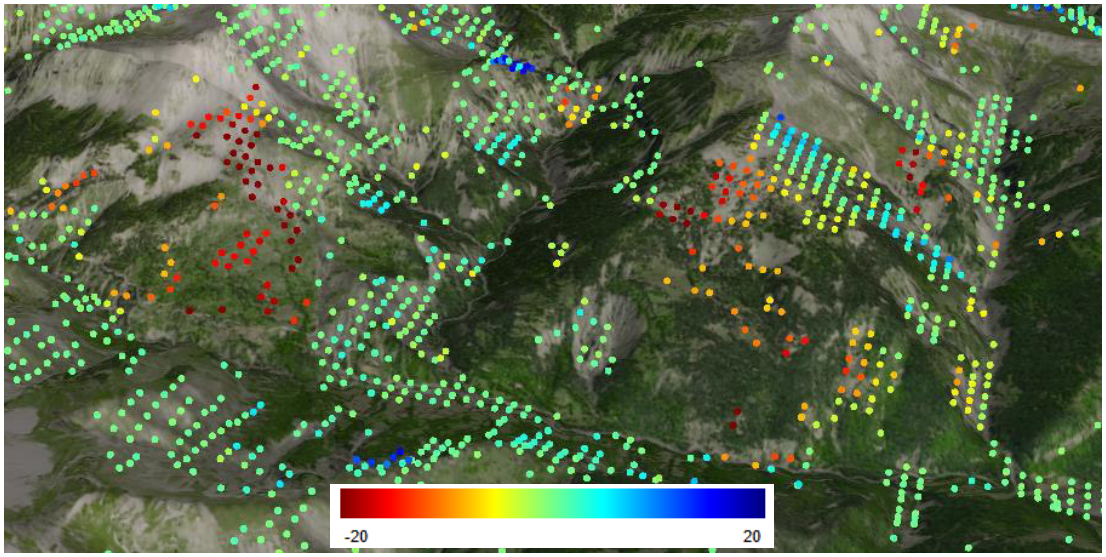


Figure 9 *Ortho* product for French Alps in horizontal / East-West direction

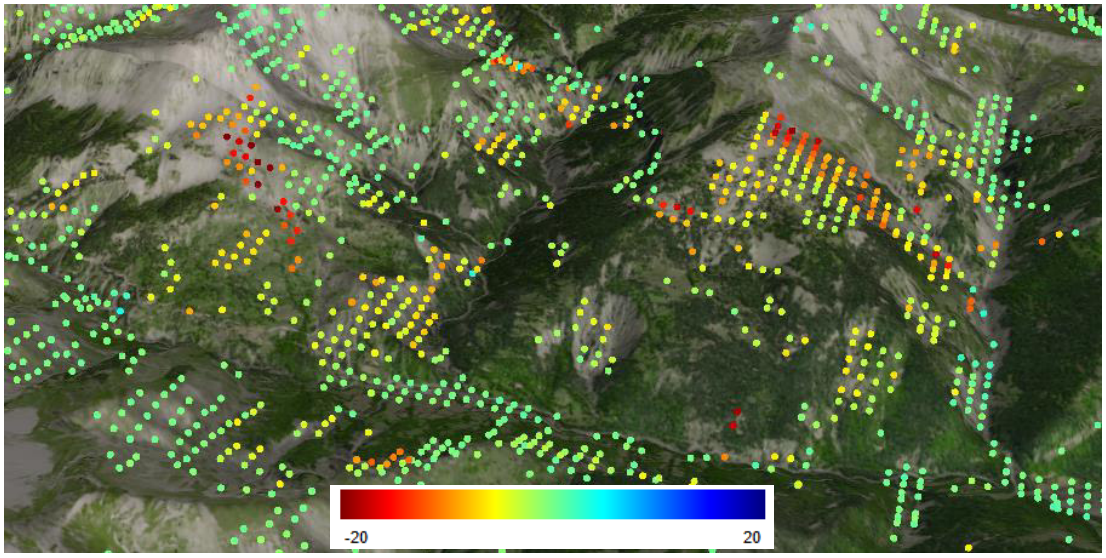


Figure 10 *Ortho* product for French Alps in vertical / Up-Down direction

A comparison of EGMS *Ortho* and *Basic* products illustrate the dependence of the measurements from local and look geometries and finally the rendering of deformation effects in the satellite based EGMS data. Examples derived in the area of Marina del Este in the municipality of Almuñécar, see Figure 11, illustrate the localisation of landslides along two flanks extending from the ridge of the promontory (aligned north-south) along the slope towards the coast in i) west and ii) east direction. Local geometry plays a role for the measurement when imaging i) and ii) in ascending Figure 11 (left) and descending Figure 11 (right) direction.

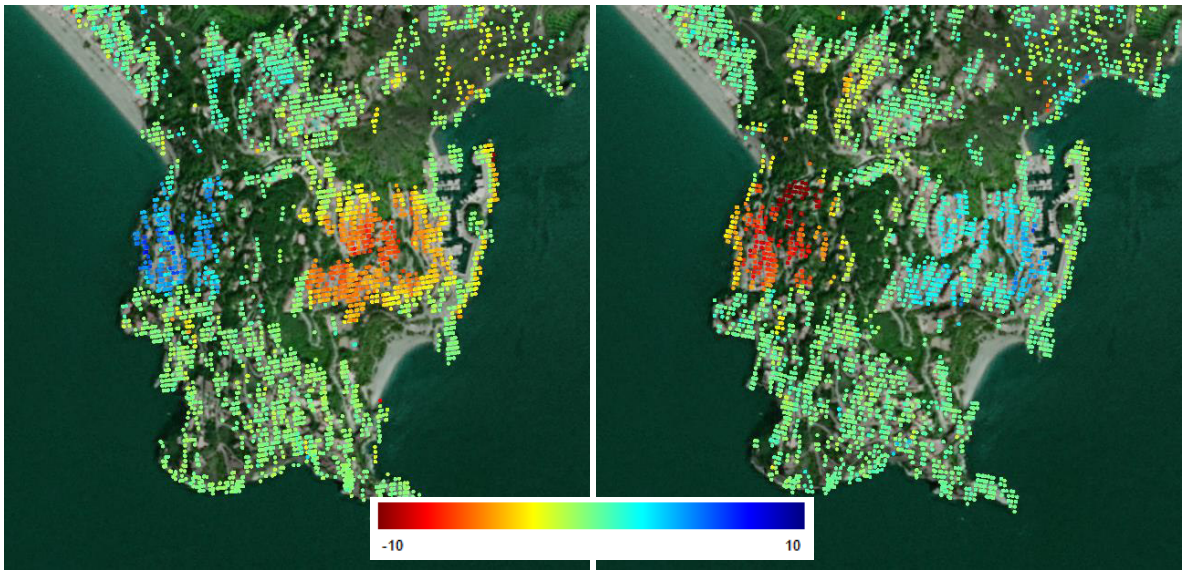


Figure 11 Comparison between ascending (left) & descending (right) *Basic* product in Almuñécar

Movement of the landslides is mapped here with the opposite sign, meaning away or towards the antenna (in LOS). In real world geometry this effect expresses the dominant east or west component of motion, as illustrated in Figure 12.

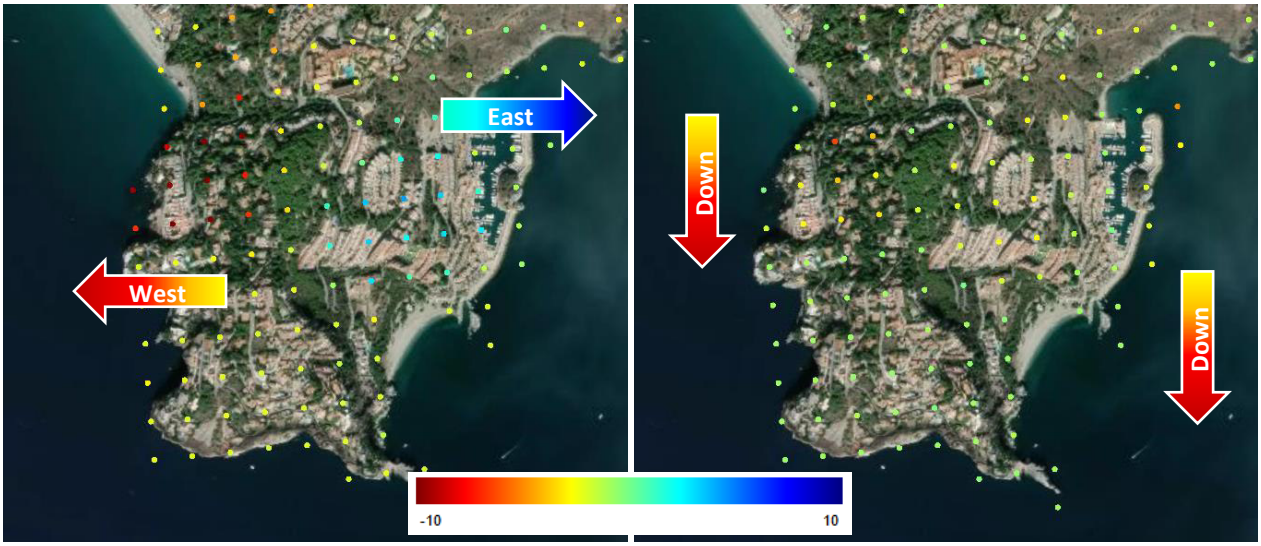


Figure 12 Comparison between East-West (left) & Up-Down (right) *Ortho* product in Almuñécar

References:

- Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., De Michele, M., Bernardie, S., Cakir, Z. (2020). Landslide Mapping and Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique in the French Alps. Remote Sensing, 12(8).
- Lima, P., Steger, S., Glade, T. (2021). Counteracting flawed landslide data in statistically based landslide susceptibility modelling for very large areas: a national-scale assessment for Austria. Landslides, 18.

5.1.2. Subsidence - Ground movements due to groundwater depletion

Ground movements due to groundwater fluctuations represent an increasing problem all over the world and may occur, among others, as result of excessive water extraction, flooding of inactive mining sites and significant seasonality of rainfalls.

Especially in urban and peri-urban areas, groundwater fluctuations appear as anthropogenic processes causing land subsidence due to excessive groundwater extraction for agriculture or industry. The Guadalentín basin in the Múrcia region in Spain serves as the perfect example of progressive terrain motion reaching LOS velocities of up to -100 mm/yr and imposing significant risk to economy, flooding and infrastructure (Jover 2016). The Guadalentín Basin is filled by Neogene-Quaternary sediments transported by the Guadalentín River along an intramontane depression located in the eastern part of the Baetic Cordillera, which is an ENE-WSW-oriented alpine orogenic belt.

Since 1960, agricultural development has required the exploitation of the aquifer system and in 1988, the amount of extraction reached a maximum historical value of 77.6 hm^3/a. After 1988, a general reduction in extraction of wells was recorded due to CO^2 pollution of groundwater resources but also because of water transfer from the Tajo River to the Segura River.

Strong impacts on groundwater levels were also caused by the major drought from 1990 to 1995 and excessive water extraction in the Múrcia urban area from 2005 to 2007. A deficit in the groundwater reserve was recorded from 1965 to 2009, corresponding to an annual rate of decline of the aquifer of 33 hm^3 (Alonso and Aróstegui, 2014).

Also the present analysis, black circled area of interest in Figure 13 are confirming the tendency appointed by former investigations with LOS displacement in the range of -30 mm/yr with a maximum mean velocity in this area up to -46.30 mm/yr.

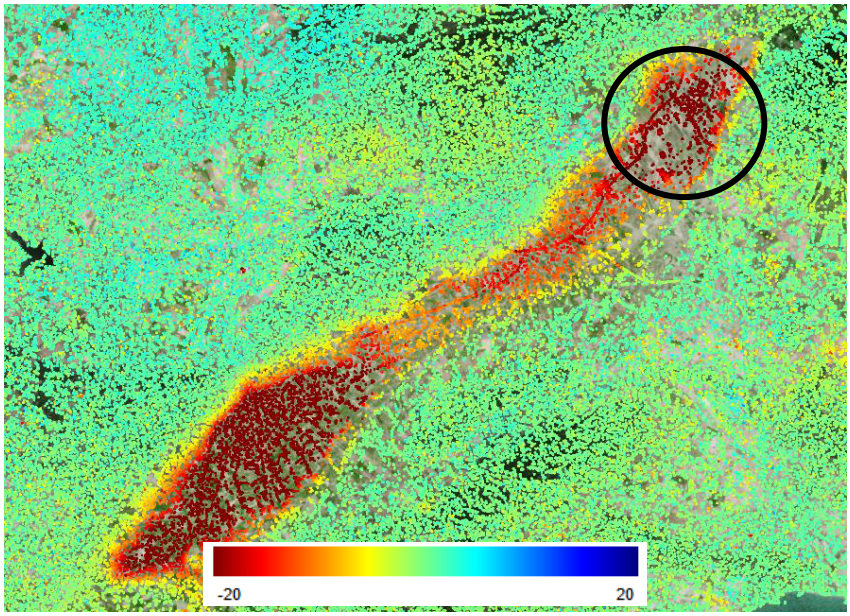


Figure 13 Continuous subsidence caused by excessive water extraction for agriculture in the Guadalentín Valley, Murcia

In previous studies the evolution of land subsidence in the Alto Guadalentín Basin (southeast Spain) was monitored using multi-sensor SAR imagery between 1992 and 2012 of C- and X-Band systems and analysed utilising advanced differential interferometric synthetic aperture radar (DInSAR) techniques (Bonì et al. 2015). The DInSAR derived surface displacement reveal a direct correlation with the thickness of the compressible alluvial deposits. Bonì et al. (2015) state that "Detected ground subsidence in the past 20 years is most likely a consequence of a 100–200 m groundwater level drop that has persisted since the 1970s due to the overexploitation of the Alto Guadalentín aquifer system. The negative gradient of the pore pressure is responsible for the extremely slow consolidation of a very thick (> 100 m) layer of fine-grained silt and clay layers with low vertical hydraulic permeability (approximately 50 mm/h) wherein the maximum settlement has still not been reached".

Following up the findings of the InSAR exercises in Guadalentín Basin, especially for C-Band, the monitoring is continued with EGMS products comparing spatial characteristics (distribution, density), motion rates and temporal trends in relevant areas.

References:

- Alonso, M.S., Aróstegui, J.L., G. (2014). Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Segura, ISBN: 978-84-92988-22-8.
- Bonì, R., Herrera, G., Meisina, C., Notti, D., Béjar-Pizarro, M., Zucca, F., Mora, O. (2015). Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study. Engineering Geology, 198.
- Jover, R. T. (2016). The Valley of Guadalentín in Lorca, the deepest in Europe according to research in collaboration with the University of Alicante. (U. o. Alicante, Editor) Acessed at 11.02.2022, available at University News: https://web.ua.es/en/actualidad-universitaria/2016/julio16/18-24/the-valley-of-guadalentin-in-lorca-the-deepest-in-europe-according-to-research-in-collaboration-with-the-university-of-alicante.html.

5.1.3. Subsidence - Ground movements due to groundwater level recharge in abandoned mines

The city of Freyming-Merlebach is suffering significant uplifts due to natural water filling in former underground coal mines. It is worth to know that the last panel of Lorraine French coalmines has been closed in 2004. To limit the extent of the rise in groundwater and to protect built-up areas suffering from subsidence, a recently installed pumping station injects fresh water into the mine galleries to reduce concentrations of iron, manganese and suspended solids before being discharged into the natural environment (BRGM - French Geological Survey, 2015).

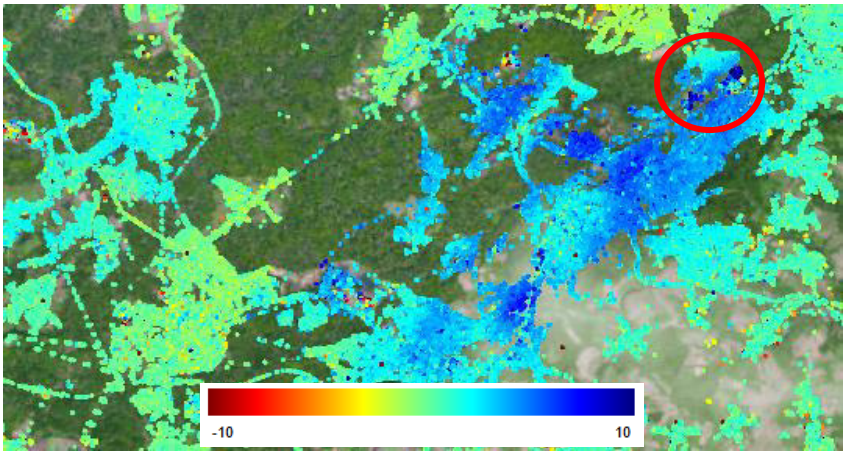
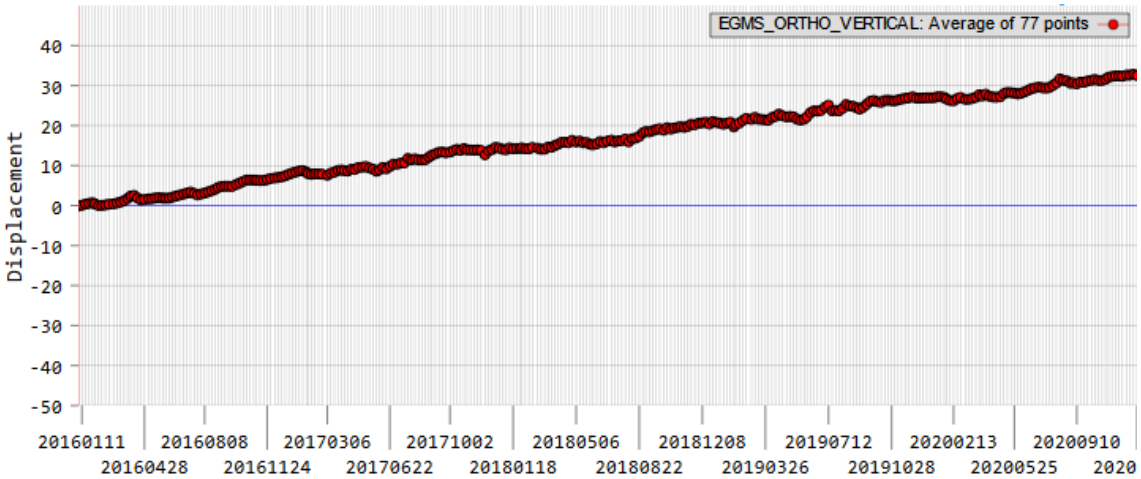


Figure 14 Increased water level in former coal mines led to significant uplifts in Freyming-Merlebach

A strong relation to hydrologic condition with increased uplift in spring and autumn is observable due to the natural overflow from Germany. Aside from this, a mean velocity of 3.02 mm/yr in ascending was measured for the entire area averaged over approx. 30000 points. When measuring the areas with the highest uplift, the mean rate of lifting processes is measured up to 6 mm/yr, with occasional peaks of 10 mm/yr.

If the *Ortho* products are additionally analysed for the area circled in red, a clear directional trend in the movement becomes visible, see Figure 15. Vertical motion is characterised by an uplift of approx. 7.3 mm/yr following a linear trend over the time series. Horizontally, considering the *Ortho* East-West components (lower graphs), a motion pattern varying in east-west is observed, with westward movement along the western edges of the uplift area of approx. 3 mm/yr and eastward movement of approx. 9.3 mm/yr at the eastern ones.



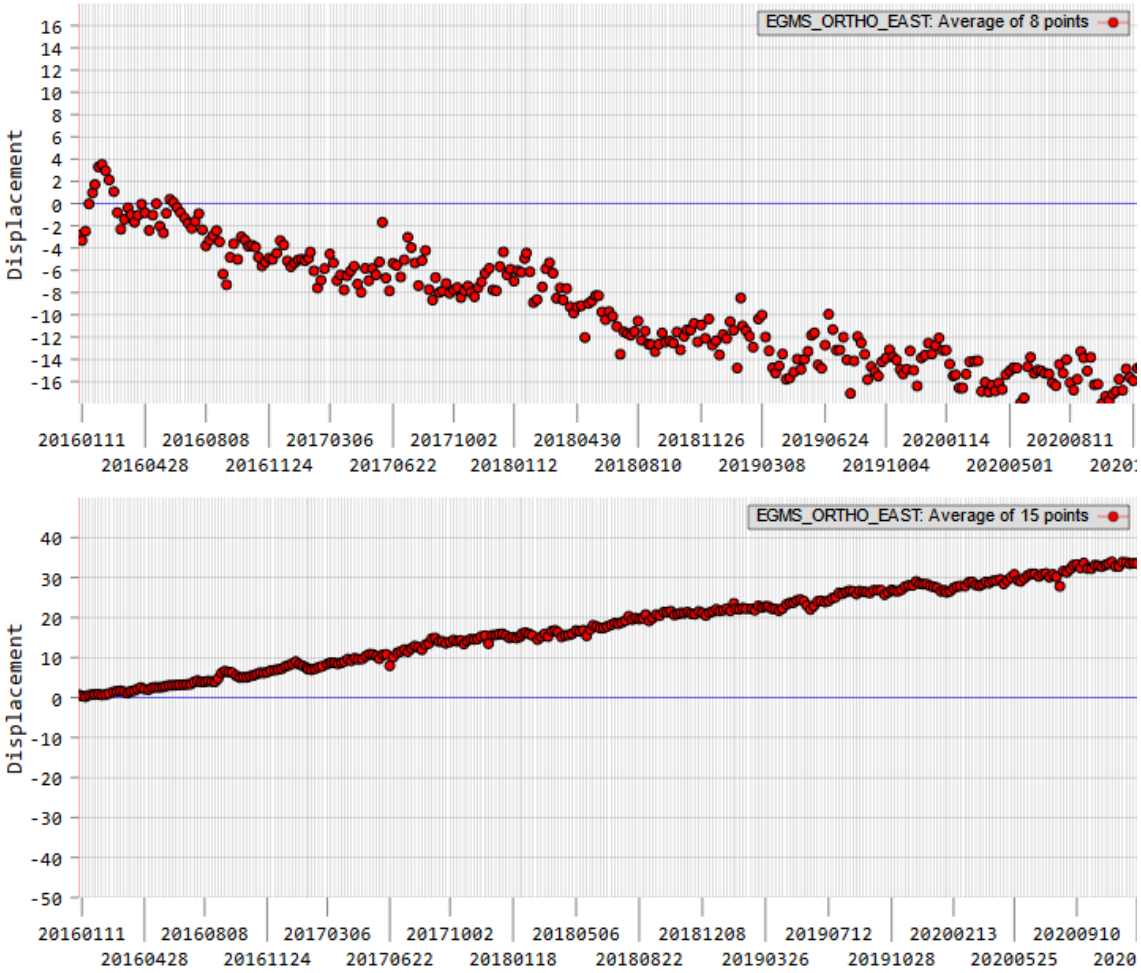


Figure 15 Average time series for *Ortho* products in Freyming-Merlebach
(top: vertical / Up-Down direction & middle/bottom: horizontal / East-West direction)

References:

- *BRGM - French Geological Survey* (2015). https://www.brgm.fr/en/news/press-kit/lorraine-coal-basin-management-water-municipality-freyming-merlebach
- Fuhrmann, T. (2016). Surface Displacement from Fusion of Geodetic Measurement Techniques applied to the Upper Rhine Graben. DGK - Deutsche Geodätische Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

5.1.4. Subsidence - Due to consolidation of organic layers/reclamations

The municipality of Fiumicino with the largest airport in Italy - "Leonardo da Vinci-Fiumicino Airport" - is located in the middle of Tiber delta West of Rome. “This region is characterized by a complex geological setting (alternation of recent deposits with low and high compressibility) and has been subjected to different urbanisation phases starting in the late 1800s, with a strong acceleration in the last few decades” (Bozzano et al. 2018).

The entire river delta is characterized by slight subsidence processes, which can be explained by the natural consolidation of the sediments of the delta. In the inner delta plain there are two reclaimed marshes, named Maccarese and Ostia ponds, which have been reclaimed over several decades, starting in 1884, with the help

of a pumping plant network. InSAR based investigations provide a possibility to measure and evaluate the development, velocities and intensity of the subsidence.

Previous studies based on ERS 1/2, ENVISAT and RADARSAT-1 in the period from 1992 to 2006 have impressively shown that very strong subsidence processes of up to 20 mm/yr can occur, especially in the Maccarese and Ostia peatlands. This is remarkable since the two northern runways of the airport are partly located on these unstable areas.

And it is in these areas that the relevance of both *Ortho* products can be seen very impressively in. The East-West product does not show any relevant motion, whereas the vertical component shows mean velocities up to -8.0 mm/yr, arriving to -20.0 mm/yr along the northern runaway. But not the entire runway is affected by ground motion. In the northern third, the runway no longer is located on the reclaimed peatlands and just in the transition between the peatlands and the sand barrier a clear stabilization can be noticed. “A clear correlation between the observed deformation pattern and the geological features is observed: for instance, the abrupt change in the deformation rate along the NS runway of the airport corresponds to the transition from […] stiff sediments to 1–2 soft organic and inorganic clays” was also stated out by Del Ventisette et al. (2015). Further strong subsidence processes are visible in the vertical product along the highway A91 which connects the airport with the city of Rome.

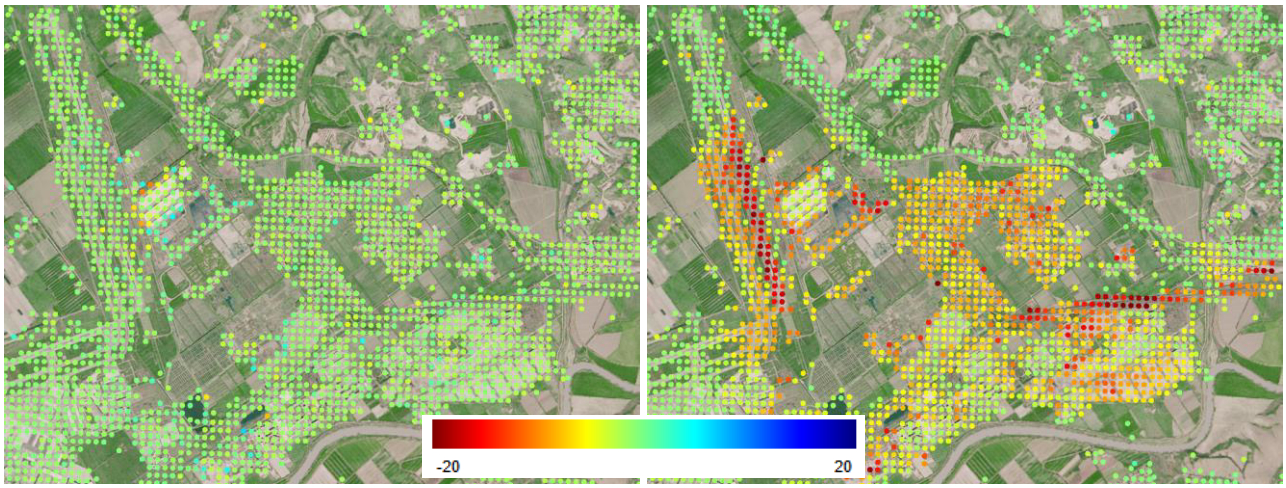


Figure 16 Subsidence processes over Maccarese peatlands in *Ortho* product
(left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down)

References:

- Blasco, J.M.D., Foumelis, M., Stewart, C., Hooper, A. (2019). Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. Remote Sensing, 11(2).
- Bozzano, F., Esposito, C., Mazzanti, P., Patti, M., Scancella, S. (2018). Imaging Multi-Age Construction Settlement Behaviour by Advanced SAR Interferometry. Remote Sensing, 10(7).
- Del Ventisetti, C., Solari, L., Raspini, F., Ciampalini, A., Di Traglia, F., Moscatelli, M., Pagliaroli, A., Moretti, S. (2015). Use of PSInSAR data to map highly compressible soil layers. Geologica Acta, 13(4).

5.1.5. Subsidence - Due to local geology and climate change on coastal sites

The 10 largest Danish cities are located along the coast and about 80% of the Danish population lives within 3 km of the North Sea and the Baltic Sea. Climate change and rising sea levels could, in connection with the geological asset and land use of the areas, lead to potential risk areas for subsidence.

Coast line shifts or changing coastal dynamics due to climate change and rising sea levels is, in contrast to land subsidence caused by gas or groundwater extraction, has been a minor topic in Denmark in the past. Potential reasons for this include the fact that the effect was assessed as comparatively low, therefore not determined as a prominent challenge so far and that data availability for analysing this problem was limited or even not existent.

The harbour of the fishing village of Thyborøn, located on the North Sea, was the subject of the study by Sørensen et al. (2016), who investigated ground motion including satellite data from Sentinel-1. The research showed that the use of InSAR techniques in combination with existing investigations adds a significant additional value to the monitoring of harbour infrastructure and coastal protection and leads to a deeper understanding of coastal phenomena. However there is still a need for an increased information base such as density or coverages to monitor the extensive area along the coast and its site specific dynamics.

The EGMS products provide long-term national coverage and can help to better understand and analyse subsidence processes due to climate change. Besides protection measures for harbour infrastructure, coastal cities and harbours are prone to risks due to climate change and sea level rise. Settlements like the fishing village Thyborøn, that are located in a coastal subsidence area could be especially affected. With a subsidence rate of up to -30 mm/yr in the vertical *Ortho* that amplifies the effect of a rising sea level, EGMS products give an indicator for risk areas which can directly be included in the planning process or the risk grading along the Danish coast.

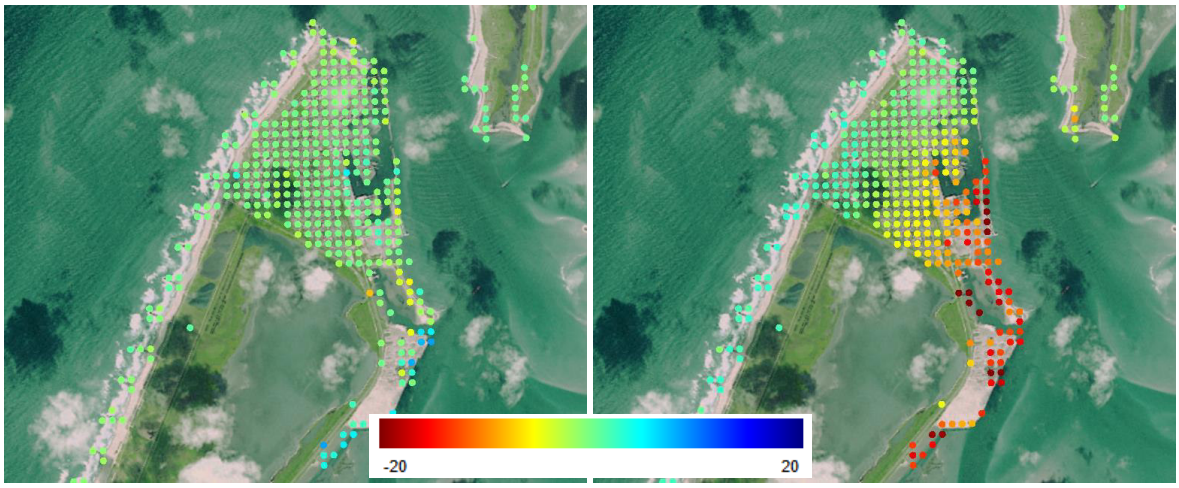


Figure 17 Port of Thyborøn with *Ortho* products (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down)

References:

- Sørensen, C. S., Broge, N. H., Mølgaard, M. R., F. Levinsen, J., Okkels, N., Knudsen, P. (2016). Advancing Coastal Climate Adaptation in Denmark by Land Subsidence Mapping using Sentinel-1 Satellite Imagery. Geoforum Perspektiv, 15(28).

5.1.6. Volcanoes and volcanic-related deformation

Ground movements in volcanic areas can have different origins related to their depth under the terrain surface. Volcanic activity is a prominent example for the complexity of ground deformation in a delimited area with a variety of displacement phenomena.

Campi Flegrei

This caldera, located in the Gulf of Pozzuoli in the west of Naples, is one of the most studied volcanic fields in Europe and is described as “one of the most dangerous quiescent volcanic systems in the world” (Piochi et al. 2008).

Troise et al. (2019) state that “Since 1950, it has undergone four episodes of caldera-wide uplift and seismicity, which have raised the coastal town of Pozzuoli, near the centre of unrest, up to 4.5 m and triggered the repeated evacuation of some 40,000 people”. The unrest phases lasted for different lengths of time and are followed by phases of subsidence; the current uplift phase started in 2005. "Complex mechanisms involving magma, geothermal system, tectonic stresses” (Troise et al. 2019) are responsible for the undergoing continuous unrest.

Since the beginning of the time series in 2015 until the end of 2020, uplift processes have been detected and estimated in a maximum of 70 mm/yr visible in *Ortho* product. The current uplift phase has been running since 2005 associated with an increase of the seismicity rate and of the degassing activity in the phlegraean fields (Tramelli et al. 2021). Despite the continuing unrest and the shift between uplift and subsidence phases, the last eruption of the caldera dates to 1538.

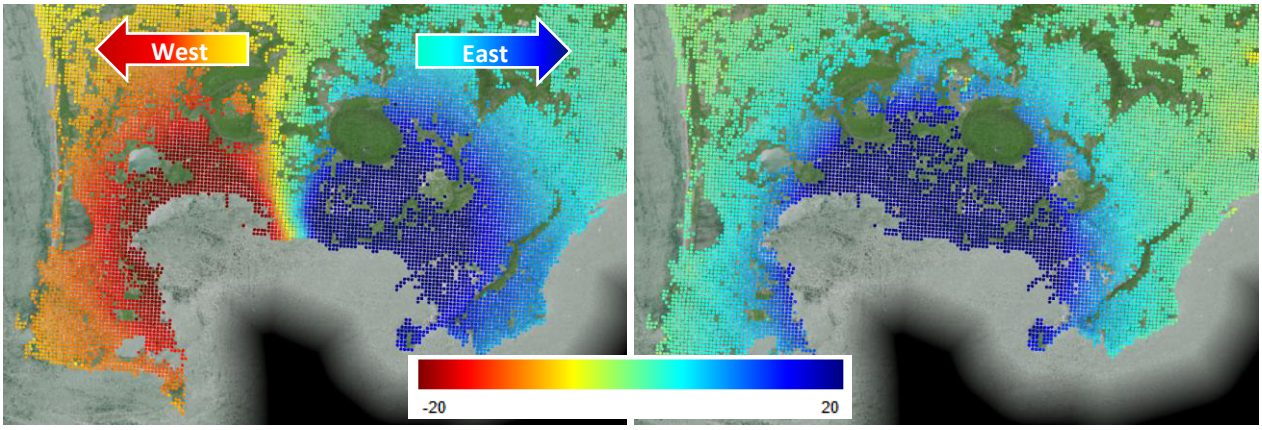


Figure 18 *Ortho* products at Campi Flegrei with strong uplift process (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down)

The Campi Flegrei area is located in a densely populated area so that the knowledge of active ground motion is of paramount importance for civil protection activities. Currently, the Italian Civil Protection Department manages the seismic, geochemical and deformation monitoring of the area. Global positioning system data and interferometric products are part of the monitoring system (Casu et al., 2019). The products of the EGMS offer an additional contribution to the knowledge of this complex volcanic system.

The examples of EGMS ortho data, shown in Figure 18, represent an ideal illustration of a significant and intensive uplift area or dome rendered in its horizontal (east-west) and vertical motion. Vertically strong upward motion is found in the nearly circular uplift area in the right image of Figure 18 with its maximum velocity (up) in the centre of the area and decreasing velocities towards the edge. Horizontal movement, namely in east-west direction as shown in the left image of Figure 18, shows the expected pattern of eastward and westward directed components of the velocity field over the uplift dome. Here eastward motion dominates on the eastern flanks and westward motion on the western flanks of the uplift dome.

Mount Vesuvius

The cone region and crater of Vesuvius in the east of Naples is also characterized by ground movements over time. But these are not steady uplift processes as in the caldera; on the contrary subsidence with small periodic uplifts with an overall mean displacement rate of -13 mm/yr is recorded. Although these two systems are considered to be separated, some authors suggest a possible interconnection with the seismic processes of one that may have a direct or indirect effect on a neighbouring volcano (Walter et al. 2014).

Thus, even years later, the EGMS *Basic* and *Ortho* product shown in Figure 19 confirm the studies who observed "long term subsidence with a nearly constant rate and well-defined seasonal oscillations" (Samsonov et al. 2014) since the beginning of the 2000s at Vesuvius.

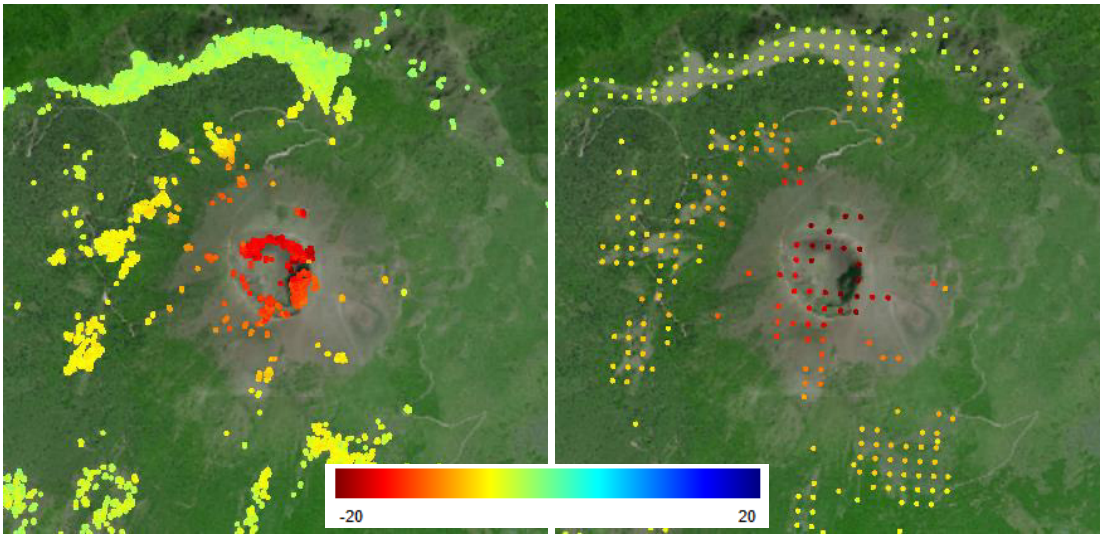


Figure 19 *Basic* and *Ortho* product of Mount Vesuvius with long term subsidence (left: ascending & right: vertical / Up-Down)

References:

- Beccaro, L., Tolomei, C., Gianardi, R., Sepe, V., Bisson, M., Colini, L., De Ritis, R., Spinetti, C. (2021). Multitemporal and Multisensor InSAR Analysis for Ground Displacement Field Assessment at Ischia Volcanic Island (Italy). Remote Sens. 2021, 13.
- Bignami, C., Albano, M., Guglielmino, F., Tolomei, C., Atzori, S., Trasatti, E., Polcari, M., Puglisi, G., Stramondo, S., Salvi, S. (2019). InSAR imaging of the December 2018 Etna Eruption. EGU General Assembly 2019. Geophysical Research Abstracts, 21.
- Casu, F., Bonano, M., Castaldo, R., De Luca, C., De Novellis, V., Lanari, R., Manunta, M., Manzo, M., Onorato, G., Pepe, S., Solaro, G., Tizzani, P., Valerio, E., Zinno, I. (2019). Monitoring Volcano Deformation from Space with Sentinel-1 Data for Civil Protection. IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- De Novellis, V., Atzori, S., De Luca, C., Manzo, M., Valerio, E., Bonano, M., Cardaci, C., Castaldo, R., Di Bucci, D., Manunta, M., Onorato, G., Pepe, S., Solaro, G., Tizzani, P., Zinno, I., Neri, M., Lanari, R., Casu, F. (2019). DInSAR analysis and analytical modelling of Mount Etna displacements: The December 2018 volcano-tectonic crisis. Geophysical Research Letters, 46.
- Piochi, M., Polacci, M., Des Astis, G., Zanetti, A., Mangiacapra, A., Vannucci, R., Giordano, D. (2008). Texture and composition of pumices and scoriae from the Campi Flegrei caldera (Italy): Implications on the dynamics of explosive eruptions. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 9.
- Samsonov, A.V., González, P.J., Tiampo, K.F., Camacho, A.G., Fernández, J. (2014). Spatiotemporal Analysis of Ground Deformation at Campi Flegrei and Mt Vesuvius, Italy, Observed by Envisat and Radarsat-2 InSAR During 2003–2013. Mathematics of Planet Earth.
- Tramelli, A., Godano, C., Ricciolino, P., Giudicepietro, F., Caliro, S., Orazi, M., De Martino, P., Chiodini, G. (2021). Statistics of seismicity to investigate the Campi Flegrei caldera unrest. Scientific Reports, 11.
- Troise, C., De Natale, G., Schiavone, R., Somma, R., Moretti, R. (2019). The Campi Flegrei caldera unrest: Discriminating magma intrusions from hydrothermal effects and implications for possible evolution. Earth-Science Reviews, 188.

- Walter, T.R., Shirzaei, M., Manconi, A., Solaro, G., Pepe, A., Manzo, M., Sansosti, E. (2014). Possible coupling of Campi Flegrei and Vesuvius as revealed by InSAR time series, correlation analysis and time dependent modelling. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 280.

5.2. Civil Engineering & Infrastructure

5.2.1. Buildings - Ground movements as a result of geothermal drilling

In the small German town of Staufen im Breisgau, located in the state of Baden-Württemberg, geothermal drilling with a final depth of 163m was carried out in the summer of 2007 under the local town hall. The purpose was to take advantage of geothermal energy to heat and cooling the two buildings during the renovation of the town hall.

The local geological asset created several problems after the realisation of the geothermal exploitation system. In fact, a deep-lying anhydrite layer is found directly beneath the historic old town; by absorbing the hot fluids from the depths like a sponge, anhydrite is converted into gypsum. “The swelling process occurred relatively slowly due to its kinetics and medium-to-low hydraulic permeability in this zone. The swellable anhydrite layers were located at a depth between 61.5 and 99.5 m below ground level” (Fleuchaus et al. 2017). This increases the volume of the rock and a surficial uplift of 60 cm in 10 years has been recorded in the city centre with an additional lateral displacement of 43 cm. This process has not come to an end and have damaged about 270 houses and caused costs of several million euros. As a countermeasure, for example, pumps were installed to keep the groundwater level low so that further swelling and thus ground motion are prevented. “The uplift rate was reduced from initially 11.0 to 3.5 mm per month. Since it is not possible to recover penetrated water from sulphate-bearing layers, swelling will stop only when there is no more inflow of groundwater" (Fleuchaus et al. 2017).

The following figures show that the ground motions in the EGMS *Basic* and *Ortho* products are clearly visible and that displacement and uplift processes, in average of 11 mm/yr, are still not completed. In the *Basic* product, however, phases of stabilization can be detected every spring, which are then again characterized by uplift of about 4 mm from summer to winter months. These data can therefore be easily used to identify trends in displacement processes, to assess the impact of measures taken, evaluate potential risk and dangers or to justify an entirely new planning to handle situations like these.

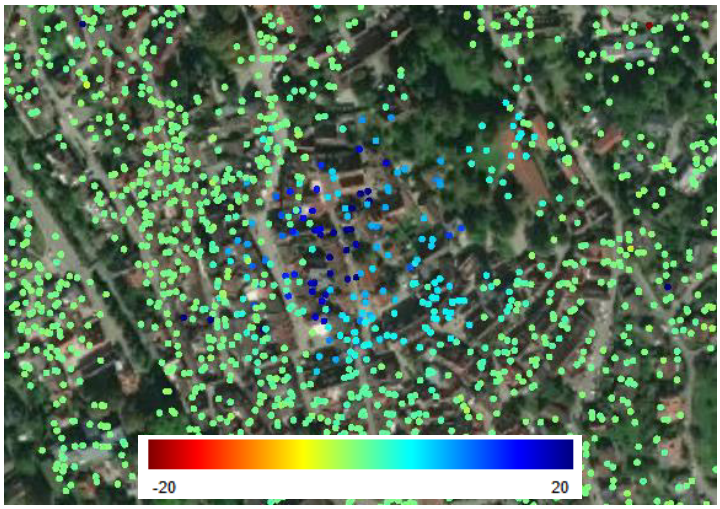


Figure 20 Uplift processes visible in *Basic* (ascending & descending orbit) in the city of Staufen im Breisgau

The results in *Ortho*, indicates the direction of the motion. In the east-west direction a mean velocity of -2.95 mm/yr is determined, which indicates a westward movement of the surface. In contrast, the vertical component is estimated in around 4 mm/yr.

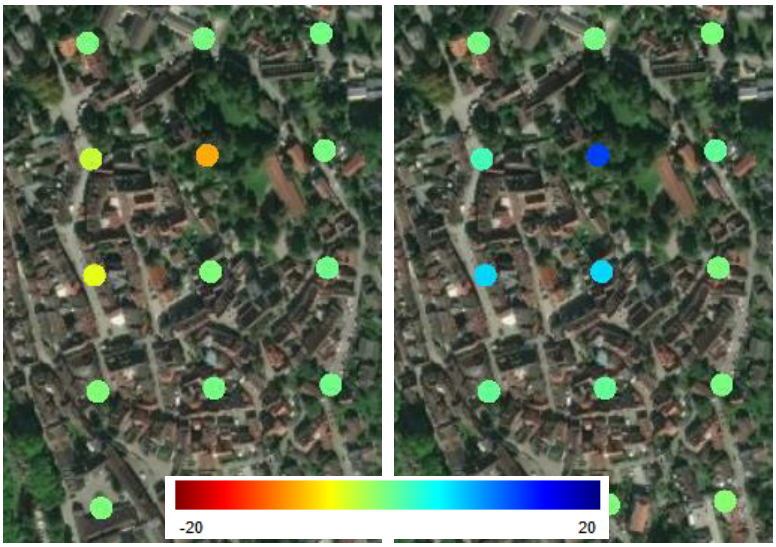


Figure 21 Westward shift in horizontal (left) and uplift in vertical (right) *Ortho* product for the city of Staufen im Breisgau

References:

- Butscher C., Mutschler T., Blum P. (2016). Swelling of clay-sulfate rocks: a review of processes and controls. Rock Mech Rock Eng. 49.
- Fleuchaus, P. and P. Blum (2017). Damage event analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. Geotherm Energy 5, 10.
- Sass, I. and U. Burbaum (2010). Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations. ACTA CARSOLOGICA 39, 2.

5.2.2. Linear and Critical Infrastructure - Detection of motion of the structure and surroundings

The city of Antwerp located along River Scheldt is the second-largest metropolitan area of Belgium and is home of the second largest port in Europe in terms of annual cargo volume, and additionally home of the second largest chemical industrial park in the world. Utilisation of EGMS products potentially provides the basis to detect and analyse movements in the area of the port itself and its vicinity, opening up topics in a variety of applications such as monitoring critical and linear infrastructures or buildings, risks along transport logistics chains, etc.

Ship berths, quays, cargo storage areas, ships locks and also transport infrastructure are subjected to heavy loads continuously for a long period of time in order to handle the millions of tons of cargo day-by-day. In order to continue to manage the increasing load, the port is being extended, continues to grow and therefore induces an enormous impact on natural characteristics of the harbour and surrounding area, which makes these areas vulnerable for ground motion.

The products of the EGMS represent an additional information source useful to detect, understand, analyse or evaluate the effects of ground motion directly on linear and critical infrastructures plus to assess second order effects on port operation or transport logistics. Therefore “deformation monitoring of critical infrastructure assets is of major importance for preventing damage and losses” (Schlögl et al. 2021).

Areas with potential risks for critical infrastructure are found to a huge degree in the port area of Antwerp, characterised by medium subsidence in a range of 2.5 to 3.5 mm/yr downwards and negligible motion in East-West direction with subsidence peaks of up to 10 mm/yr in parts of the port with velocities of up to 6 mm/yr in E-W. In terms of the spatial context subsiding areas with different magnitude of deformation are distributed in the port area, potentially effecting the stability of the port infrastructure or leading to structural stress. Subsidence areas are furthermore present around the port area comprising the logistics infrastructure, such as railway and road networks. Along those linear structures both components of motion need to be analysed to indicate potential damages.

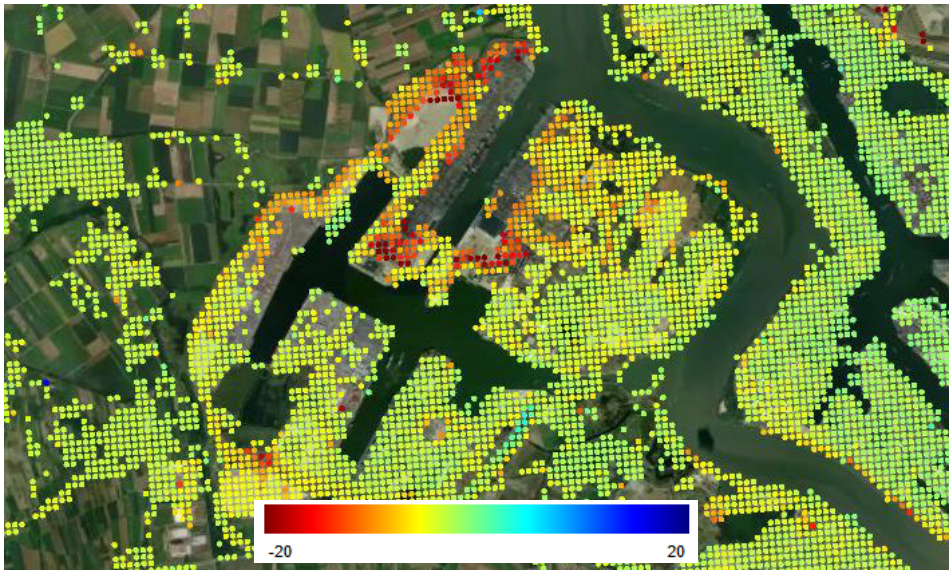


Figure 22 Port of Antwerp with vertical / Up-Down *Ortho* product

References:

- Declerqc, P.-Y., Gérard, P., Pirard, E., Walstra, J., Devleeschouwer, X. (2021). Long-Term Subsidence Monitoring of the Alluvial Plain of the Scheldt River in Antwerp (Belgium) Using Radar Interferometry. Remote Sensing, 13(6).
- Schlögl, M., Widhalm, B., Avian, M. (2021). Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 172.

5.3. Mining and Oil & Gas

5.3.1. Mining - Ground motion as a result of mining activities

Mines, both surface and underground, exist all over the world to extract resources from the ground and "remote monitoring of ground deformation from radar satellites has become an operational tool for mines world-wide" (Colombo & MacDonald 2015). While above-ground mines can be monitored using both optical and radar-based systems, underground mining areas are a particular challenge. It is irrelevant whether the mines are active or abandoned. The influences and consequences of mine activity can sometimes occur years later or are difficult to measure and detect only on a small scale.

In the last years, the potentials to use InSAR and associated techniques have steadily improved. Not only the spatial but also the temporal resolution has improved significantly, so it "has brought InSAR technology to the forefront of mine site deformation monitoring" (Colombo & MacDonald 2015). Therefore the products of EGMS with their temporal coverage rate of up to 6 days and a high spatial resolution offer the possibility to detect different effects of mining to the surrounding area and the mine at itself.

One use case covers mining activities and dynamics in the region Ostrava/ Katowice extending from Czech Republic to Poland. The Upper Silesian Coal Basin (USCB) reaches from the Ostrava region in Czech Republic to Katowice in Poland. It forms an industrial region dating its activity back to the 12th century. With the 19th century's underground coal mining, ironworks and coal fired power plants were intensified and have left a significant imprint on the local environment. About 30 underground coal mines are still in operation within the USCB area. Active mines as well as closed mines are found in close vicinity, and both affect the water and groundwater regime. In addition to environmental impacts deformations due to mining activities and a changing groundwater regime pose a risk to industrial and human infrastructure. Finally the use case covers issues of an essentially dynamic area in terms of deformations and complex patterns. Besides mining operations it's of high relevance for environmental and geo-risk impacts as well as planning or transformation plus inter border issues.

Deformation phenomena in the USCB show high dynamics at explicit features and with a high magnitude of motion. These characteristics can be summarised in depression cones with subsidence in a range of up to 15 – 20 mm/yr down and approx. 8 mm/yr eastward on the western flank and approx. 15 mm/yr westward on the eastern flank of the cone. There are also uplift areas with velocities up to a range of 10 – 15 mm/yr together with maximum velocities of 5 mm/yr westward on the western flank and 5 mm/yr eastward on the eastern flank of the dome.

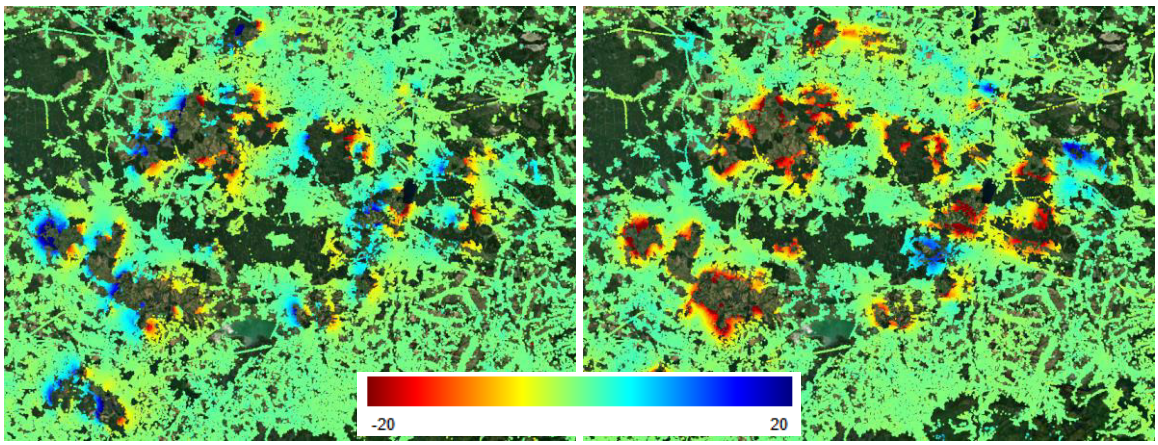


Figure 23 Mining related ground motions at USSB (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down)

Another example of ground movements as a result of mining activities is found in northern Sweden in the Malmberget/Gällivare area and was investigated by Makitaavola et al. (2018). Initially, mining was carried out above ground, but was then gradually moved underground. Because of these different methods, this mining region represents a particularly high potential for ground movement. This is also confirmed by geological investigations, which show that the area has several potential large-scale deformation zones. As both the adjacent settlements and the mining area continue to expand, houses have to be relocated and the mining area moves further and further under the towns and settlements, so that since 2009 it has been necessary to monitor the ground movements throughout with GPS support to monitor the transformation of these area. Currently, these measurements only take place once a quarter, which means a total of 4 measurements per year. The EGMS products can therefore support the on-site measurements by providing movement information at significantly shorter intervals and also enable long-term monitoring with comparatively significantly shorter intervals between measurements.

As shown in Figure 24, the Ortho product indicates that the horizontal movements (peaks up to -24.60 mm/yr) are intensive especially in the western and eastern parts of the subsiding area that tends to move down with maximum -18.1 mm/yr at the core of the mining area. This significant motion in this site indicates potential risk areas where damages to infrastructure and settlement areas can be expected.

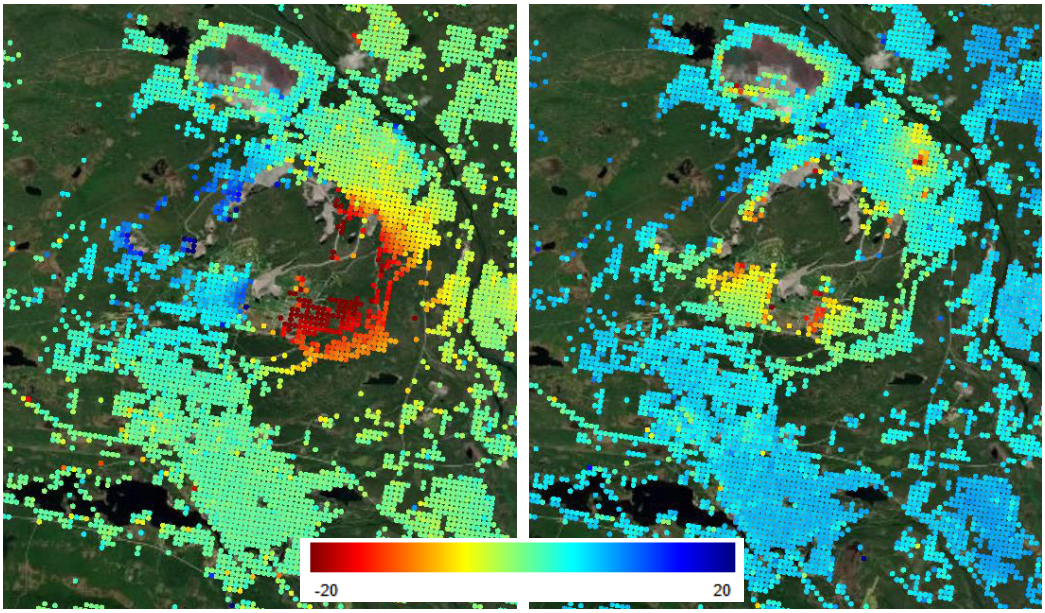


Figure 24 Mining related ground motions at Malmberget/Gällivare (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down). The positive ground motion signal surrounding the mine in the Up-Down component is given by the regional uplift due to post-glacial rebound.

References:

- Colombo, D., MacDonald, B. (2015). Using advanced InSAR techniques as a remote tool for mine site monitoring. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Slope Stability 2015.
- Makitaavola, K., Stockel, B.-M., Savilahti, T., Sjoberg, J., Dudley, J., McParland, M.A., Morin, R. (2018). InSAR as a practical tool to monitor and understand large-scale mining-induced ground deformations in a caving environment. Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics.

5.3.2. Mining - Ground motion as a result of salt solution mining

Salt is extracted from the salt layers of the Zechstein Unit at a number of sites in Poland, Germany and the Netherlands.

EGMS data helps to understand the dynamics occurring during Salt deformation processes in the Veendam salt pillow located at the southern boundary of the Groningen district and contributes an efficient means of monitoring compliance with the maximum permitted subsidence rates.

A producer of calcium chloride, magnesium chloride, magnesium oxide and magnesium hydroxide, uses solution mining to extract carnallite and bischofite salt near Veendam. This technique injects water into the salt layers and pump out the resulting brines. Twelve wells have been drilled at a depth ranging from 1.400 to 1.800 meters. This mining activity triggers subsidence.

A subsidence bowl is created near Veendam due to solution salt mining between 1972 and 1991. Dissolution of the salt results into overburden that is not fully supported from below causing surface subsidence (Raith 2017). Satellite radar interferometric measurements performed by TU Delft over the period 1992-2003 revealed subsidence of about 120 mm (Hanssen 2006)

As shown in Figure 25 continuous negative LOS displacement with mean velocities of -25mm/yr could be observed, exceedingly the rates derived by TU Delft in former periods. Moreover, an acceleration of displacement starting from spring 2018 is notable.

The independence of the measurements in the ortho data from the viewing geometry render the deformation effects the salt mining area in a way that is easier to interpret for the user. The subsidence cone in the central part of Figure 25 (right) is represented by a downward velocity of approx. 20 mm/yr. The extent of the cone can be estimated along MPs following linear features and indicating similar subsidence rates, e.g. roads heading northwest from the subsidence area and showing downward motion.

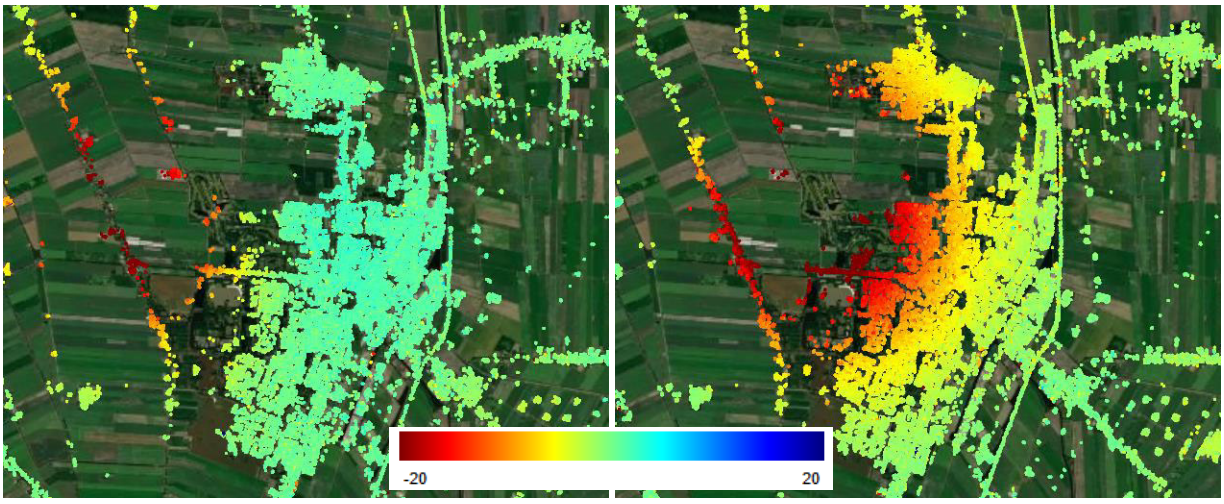


Figure 25 *Basic* product for Veendam (Netherlands) ground deformation due to salt solution mining (left: ascending & right: descending)

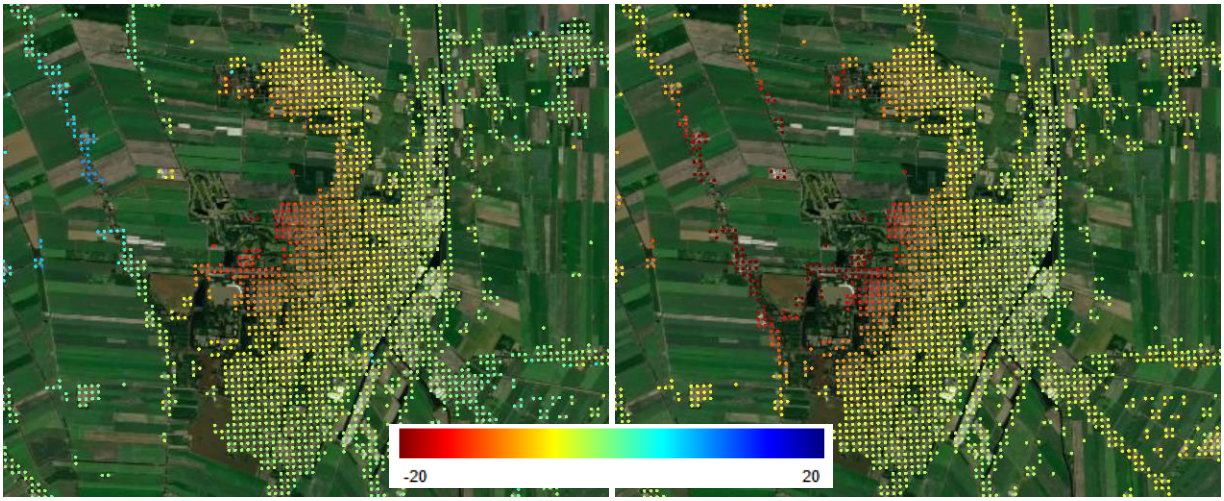


Figure 26 *Ortho* product for Veendam (Netherlands) ground deformation due to salt solution mining (left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down)

References:

- Hanssen, R. F. (2006). Salt Mining Deformation.
- Raith, A. S. (2017). Internal deformation of salt bodies with large mechanical contrast: a case study of the Veendam salt Pillow, the Netherlands.

5.3.3. Gas - Linear and seasonal trends in ground motion

The largest natural gas field in Europe and the 10th largest field in the world is located near the Dutch city of Groningen. This field opened in 1959 and exploited since 1963 for half a century. It represents an important economic factor and has a significant role in the energy supply for the Netherlands as well as the surrounding countries which obtain gas from this field. During production the risk of seismic events became evident with a series of earthquakes beginning with 1986 and with increasing frequency since 1991. Earthquakes with largest magnitudes caused damage to roads, buildings, etc. and altered the production and operation of the field with the goal of decommissioning the field.

The EGMS products offer a unique possibility to analyse ground movements during production, storage and depletion retrospectively from 2015 onwards and to monitor the consequences of the closure of the gas field with the annual updates in the future. Besides the technical complexity this case illustrates topics of public interest, such as seismic risk and risk exposure to the inhabitants, inter-border relations in terms of gas production and storage as well as geopolitical issues with the future use and transport of gas.

The gas field at Groningen, here visualised with *Ortho* products, shows specific characteristics, such as that the gas extraction areas subsiding at 5.0 to 15.0 mm/yr down and 2.0-11.0 mm/yr westward in the eastern parts of the field and 1-6 mm/yr eastward in the western parts of the field.

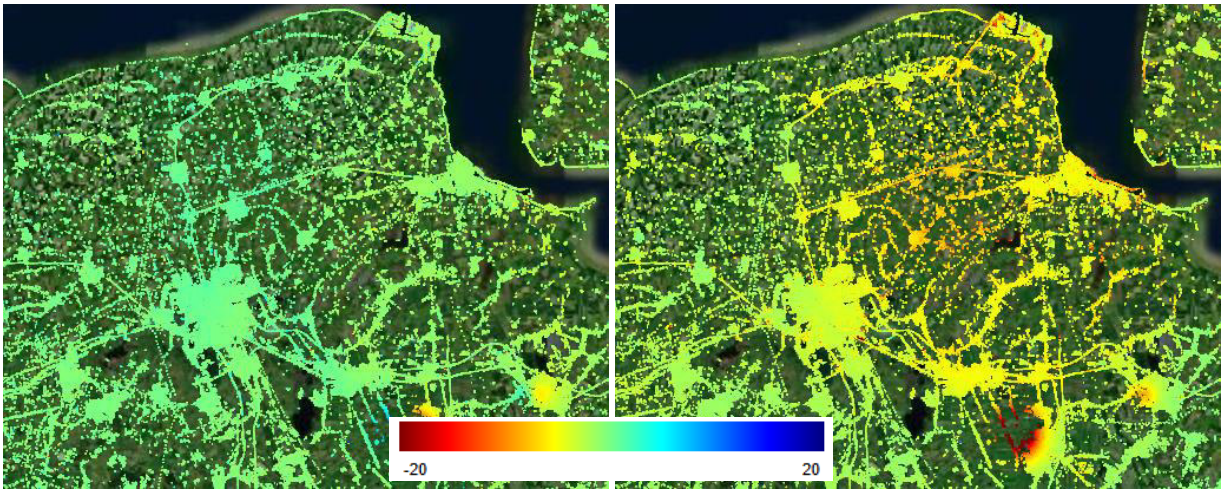


Figure 27 Groningen gas field with *Ortho* products
(left: horizontal / East-West & right: vertical / Up-Down)

Nevertheless, as the plots for the *Ortho* products in Figure 28 indicates, the area of the gas reservoir shows an explicit seasonal signal, which could be correlated to its fuel state. The signals clearly show that there is subsidence of up to -16 mm, especially in the vertical direction, which is due to the storage tanks being drained in winter. In summer, on the contrary, the empty reservoirs are filled up again and uplift processes of 12-13 mm can be recognized. Despite this, there is a downward trend visible over the entire time series from 2016-2020 in the affected area.

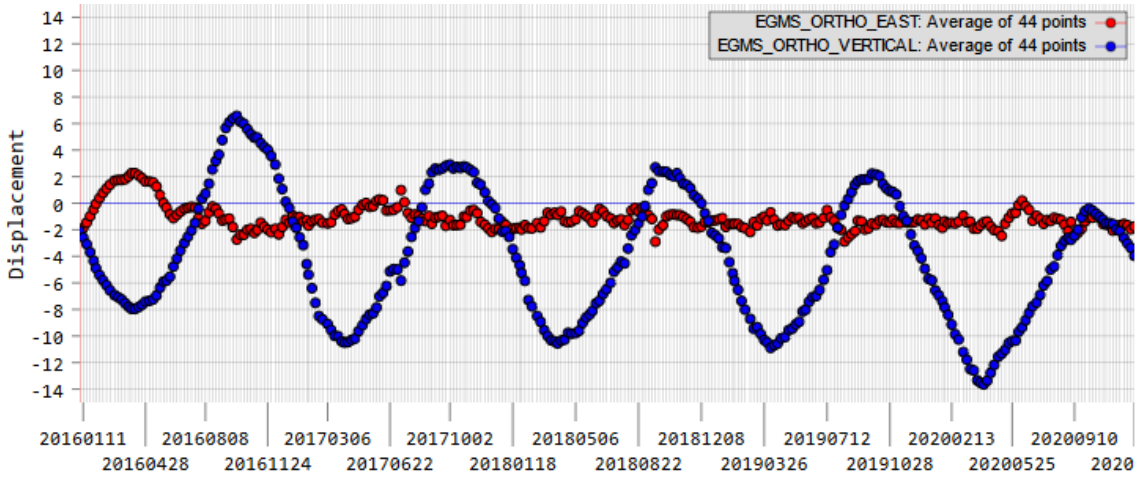


Figure 28 Plots for *Ortho* products over UGS Norg in southwest of Groningen

References:

- Thienen-Visser, K. van, Pruiksma, J.P., Breunese, J.N. (2015). Compaction and subsidence of the Groningen gas field in the Netherlands. Proc. IAHS, 372.

5.4. Cultural Heritage

5.4.1. Venice

The Venice Lagoon and the city itself have been on the UNESCO World Heritage List since 1987 and are therefore subject to special care and protection. "The city of Venice and its surrounding lagoon is presently one of the sites most sensitive to land subsidence worldwide. Even a few mm loss of ground elevations with respect to the mean sea level can significantly change the natural lagoon environments and threaten the city's survival" (Tosi et al. 2018). Research based on high resolution X-band Data concluded that short repetition intervals in SAR data allow measurable changes in the sub-millimeter accuracy and high spatial resolution helps to detect the large variability of ground deformations, captures motions that no other measurement techniques can detect and that a wide number of ground motion points reveal large-scale ground motion patterns as well as dynamics at both local and regional scales.

Both the *Ortho* product in Figure 29 and the corresponding time series plot in Figure 30 show a subsidence processes of the entire lagoon and for the area circled in red with a mean velocity of -2.36 mm/yr and occur without any particular peaks or unusual outliers.

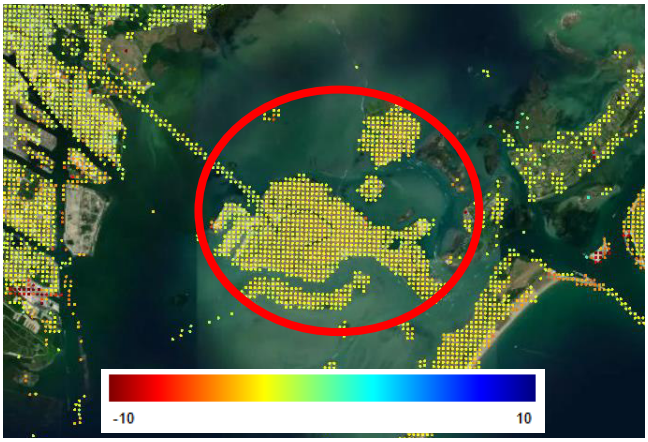


Figure 29 Vertical / Up-Down *Ortho* product for Venice (Italy)

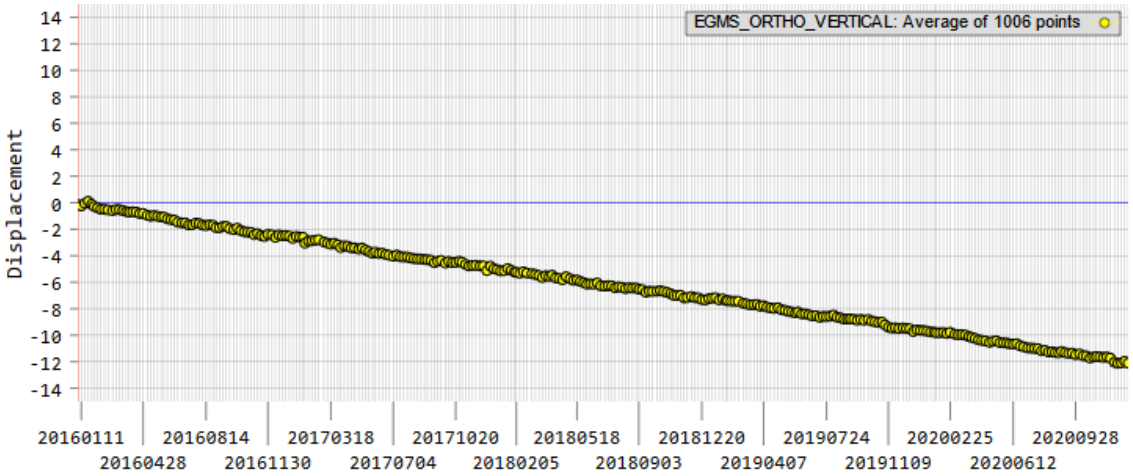


Figure 30 Average time series for Vertical / Up-Down *Ortho* product for Venice (Italy)

References:

- Tosi, L., Da Lio, C., Teatini, P., Strozzi, T. (2018). Land Subsidence in Coastal Environments: Knowledge Advance in the Venice Coastland by TerraSAR-X PSI. Remote Sensing, 10(8)

6. InSAR Definitions

Describing and specifying EGMS products necessitates the use of various technical terminology (i.e. InSAR "jargon"). The following glossary, presented in alphabetical order, defines those terms used in this document that are InSAR-specific and may not be immediately understandable by the non-specialist.

For those who want a deeper understanding of the principles and theories behind InSAR and the processing behind EGMS products, please see the EGMS *Algorithms and Theoretical Basis* [RD1].

Accuracy vs. precision

These terms are used with specific meaning in EGMS documentation (and in space geodesy) and can be confused. *Accuracy* refers to how close a measurement is to the true value, while *precision* refers to how close measurements of the same item are to each other, so a clock can be very precise and keep time to within fractions of a second each day, but if it's set to be three hours out, it's still not very accurate. Figure 31 below provides a different example:

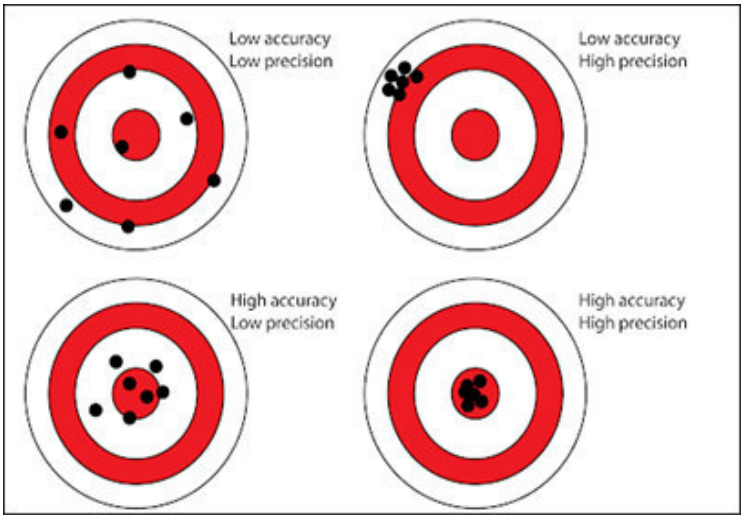


Figure 31 Accuracy vs. precision (from http://www.antarcticglaciers.org)

EGMS *Basic* products are *relative* to one of the InSAR measurement points within the same dataset, and the tolerances in any measurement therefore represent a ***precision***. EGMS *Calibrated* and *Ortho* products are anchored to a real-world, GNSS-controlled, geodetic reference frame, and any tolerances in InSAR measurement consequently relate to the 'real world' and are presented as an ***accuracy***.

Ascending & descending geometry

Sentinel-1 is a near-polar-orbiting mission, and 'ascending' and 'descending' are terms relating to the direction of satellite travel during a particular image acquisition (see Figure 32). As the SAR instrument aboard the satellite is right-looking, two distinct geometries of SAR data are acquired when the satellite is flying from north to south as opposed to south to north. These two geometries of InSAR measurements are available in the EGMS *Basic* and *Calibrated* products as two discrete datasets. In the EGMS *Ortho* product, they are combined to constrain measurements to either purely vertical or east-west ground displacements in two discrete datasets.

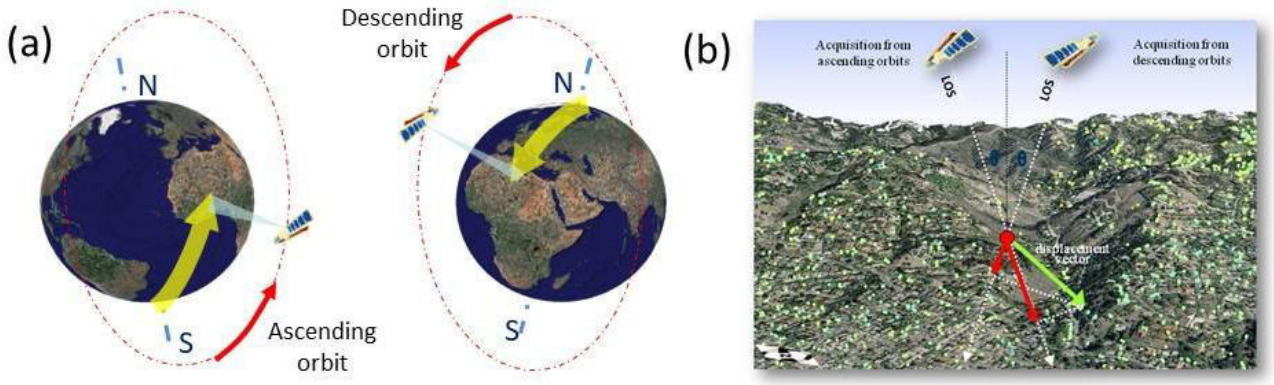


Figure 32 a) All modern satellite SAR sensors orbit the Earth in a near-polar orbit. b) By combining the rotation of the Earth and the orbital paths of the satellites, the entire surface of the Earth is illuminated by two different satellite geometries. When the satellite travels in a descending orbit (from north to south), it views a target area looking westward (in right-looking mode), while during its ascending orbit, that is, when it moves from south back to the north, it views the same target area looking eastward

Azimuth

The flight direction of the satellite. Normally orthogonal to the SAR instrument's direction of look (see Figure 33):

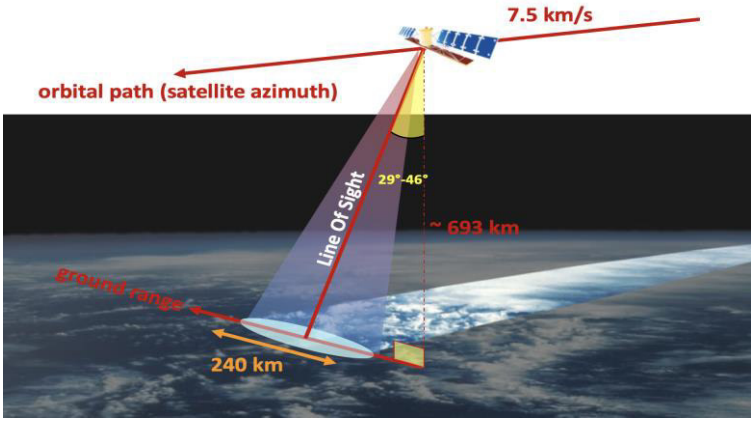


Figure 33 Image acquisition geometry of Sentinel-1

Azimuth of Basic & Calibrated InSAR measurements

The compass direction of the InSAR Line-of-Sight (see Figure 33) measurement (also orthogonal to the satellite flight path).

(Temporal) Coherence

A measure (from 0-1) of the scattering similarity between corresponding pixels in a multi-temporal SAR-image data stack. Growing and moving vegetation typically reduces coherence and prevents reliable InSAR measurement. The lower the coherence, the more noise, the higher standard deviation in the measurement, the overall less precision. Poor coherence is the main reason that InSAR measurement point distribution is not regular. The built environment typically provides high levels of coherence and a corresponding increase in measurement point density.

Colour-map

InSAR measurement points in InSAR velocity maps are colour-coded by average velocity in mm per year. The 'colour-map' legend defines what colour corresponds to what velocity. In practice the variance of velocities is shown as a continuous rainbow of colours, their extremes corresponding to the upper and lower limits of average velocity within the area. EGMS convention follows the norm that green points are stable, red and orange points are moving *away* from the satellite and blue points are moving *towards* the satellite (see Figure 34).

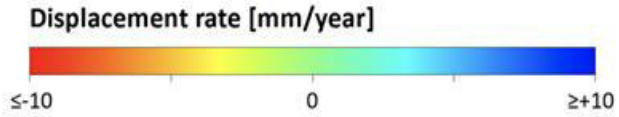


Figure 34 Example EGMS velocity colour-map

Displacement resolution

The minimum amount of displacement (in millimetres) that can be reliably measured by the system between two SAR acquisitions.

Epoch

A time instant or a specific period of time in a succession of temporal events. In InSAR analyses an epoch correspond to a specific acquisition time of a SAR image.

(Geo) locational / positional accuracy

The positional accuracy of an InSAR measurement point in the xy plane (i.e., ground coordinates). Note, the radar response from the many scattering features within each Sentinel-1 20 m x 5 m ground-cell is integrated into a single response, which is then mapped to the centre of each pixel, where in fact the absolute location of scattering dominance is usually unknown without some additional information. Whenever a dominant, pointwise, scatterer is present, surrounded by low-reflectivity objects, it is possible to apply specific algorithms to provide sub-pixel geolocational accuracy. Other variables such as the satellite orbit data and radar system parameters also influence positional accuracy.

Global Navigation Satellite System (GNSS)

A system of (systems of) of satellites providing signals that transmit positioning and timing data to receivers. The concept enables estimation of the absolute (i.e. relative to the WGS84 geodetic datum and within certain tolerances) 3D positioning over time. In order to exploit the strengths of both InSAR and GNSS data, the reference model contains average velocities in 3D (east, north, up) on a 50-km grid. Deviations from the constant velocity model, as well as motion on shorter spatial scales than the reference model, will be estimated from InSAR data with high spatial density.

Line-of-sight / SAR incidence angle

Orbiting SARs are side-looking instruments to enable range measurement. This look angle is defined as the angle between the vertical and the radar beam at the radar platform. Due to the curvature of the Earth, the look-angle is not the same as the *incidence angle*, defined as the angle between the vertical and the radar beam propagation-vector at the surface. Depending on location and range across the imaged swath, Sentinel-1 incidence angle ranges from about 21 to 46 degrees. InSAR measurements are therefore projected in the satellite's 'line-of-sight', an important consideration when considering displacements of unknown direction.

(InSAR) Measurement point

The MP is the InSAR measurement of displacement as represented on a map. Individual EGMS InSAR measurement points can emanate from the radar scattering from either a *single,* high amplitude ground resolution cell (where a dominant, pointwise, scattering centre is present: a Persistent Scatterer - PS), or from *several*, contiguous, amalgamated cells (Distributed Scatterer - DS) if the ground cover is less reflective.

MP density and distribution

MP density and distribution relates to the coverage of InSAR measurement points within a given area of analysis. MP density varies as a function of land cover (e.g., scattering features, coherence, topography), and statistics are available for comparisons of EGMS data against CORINE land cover data. Generally, MP density increases with a built environment where *point scatterers, represented by strong and stable reflectors such as poles and structures,* will dominate, as opposed to a sparser coverage of *distributed scatterers corresponding to relatively stable ensembles of targets such as bare soil or cragged/rocky surfaces,* in more rural landscapes. The spatial density of InSAR measurement points depends heavily on terrain cover: vegetated areas exhibit a low density, while urban areas are more favourable. Also, no measurement points can be identified over water, and, in general, where radar reflectivity changes with time.

Depending on the number of available Sentinel-1 scenes and the dispersion of temporal and geometrical baseline values, *2 m accuracy* can be achieved on the absolute elevation value of each MP, while, depending on the time-span of the dataset, the velocity field can be estimated with a precision *better than 1 mm/yr*. In general, the standard deviation is *better than 4-5 mm* [RD1]. Finally, depending on the radar sensor used for the analysis, the geographic coordinates of the PS can be estimated with an error of a just few meters.

Geometric effects

Side-looking radars are intrinsically limited by the geometric effects of *layover*, *foreshortening* and *shadowing* which make parts of the Earth surface invisible to the satellite. These effects only affect areas of steeper topography (see Figure 35) and prevent or strongly limit the identification of measurement points. The geometric effects are somewhat reduced by the combination of two, opposing look-angles. Refer to [RD1] for a technical explanation of geometric effects.

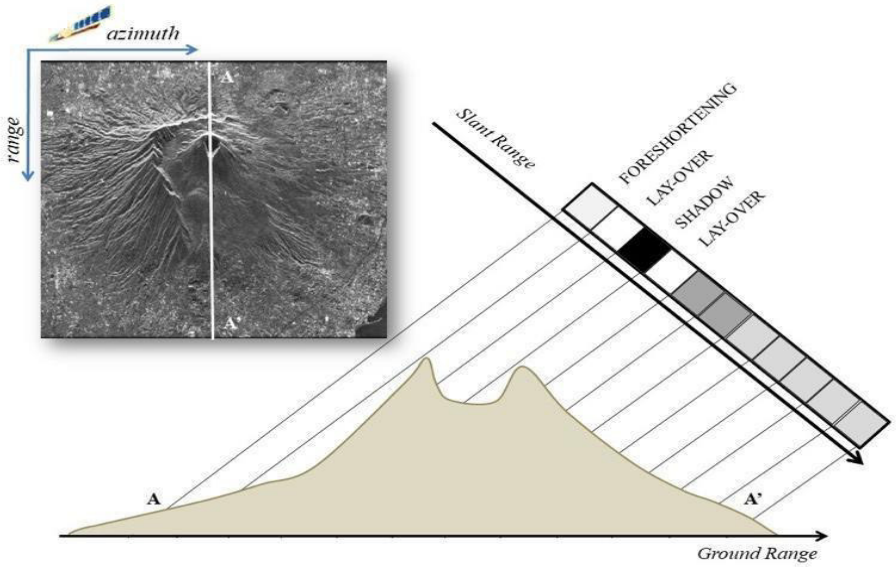


Figure 35 SAR amplitude image acquired over the Vesuvius volcano. Studying a range line passing through the volcanic edifice (section A-A') shows pixels affected by foreshortening, layover, and shadowing, as well as areas with low reflectivity values along the slides facing away from the sensor

(Coordinate) Reference System

A coordinate-based system used to locate geographical entities and involving a specific map projection in relation to a specific Earth ellipsoid. In EGMS, in agreement with other Copernicus services, the Coordinate Reference System (CRS) is ETRS89-LAEA Europe, also known in the EPSG Geodetic Parameter Dataset under the identifier: EPSG:3035. The Geodetic Datum is the European Terrestrial Reference System 1989 (EPSG:6258). The Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA) projection is centred at 10°E, 52°N. Coordinates are based on a false Easting of 4321000 meters, and a false Northing of 3210000 meters. The WGS84 reference is used that is based on the *European Terrestrial Reference System 89* (ETRS89), and its version the *European Terrestrial Reference Frame 2000* (ETRF2000).

Reference point

In InSAR, the 'reference point' commonly refers to the InSAR measurement point within a Basic-type InSAR dataset that is assumed to be stable, and to which all other measurement points are relative. The precision of InSAR measurement point time series is statistically dependent on distance from the reference point due to the influence of uncompensated tropospheric and ionospheric components that typically increase with distance. The criteria for reference point selection include: high radar amplitude, high coherence, and central location within the radar image under study, absence of local displacement. The final localisation of the reference point is retrieved by an optimised selection process minimising potential induced trends in the displacement. Reference points are only relevant to EGMS *Basic* products as *Calibrated* and *Ortho* products are made with reference to a GNSS-derived reference frame. Refer to [RD1] for a technical explanation of the role and importance of the reference point in InSAR.

Spatial resolution

The minimum size of feature that can be discerned by the system. In practice with Sentinel-1, this is determined by the dimensions of the acquisition ground-cell which are about 20 m in azimuth by 5 m in ground-range. Only one InSAR measurement is calculated for each ground-cell.

Temporal sampling of Sentinel-1 data

The total number, and distribution over time, of the SAR acquisitions processed to produce the InSAR result under analysis. A regular and dense distribution of acquisitions is preferred for higher quality results. Note, Sentinel-1 data are nominally acquired every six days over Europe.

The temporal resolution relates to the rate at which the Sentinel-1 mission, with two satellites flying 180 degrees apart, re-acquires imagery over the same place. Each satellite acquires repeat data every 12 days, and so together, acquisitions over the same place are made every 6 (six) days.

Time-series data

A *time-series* is a series of data points indexed in time order. An *InSAR time-series* relates to a single measurement point and shows the displacement of that point over time according to each SAR data acquisition with reference to the first acquisition within the epoch analysed (see Figure 36 below). MPs are evaluated according to a displacement model. The *average velocity* of each measurement point given in an InSAR velocity map is derived from the time-series of measurements for each point. Time series data are useful in revealing deviations from the average velocity, e.g. accelerations, and assist in understanding motion trends and evolution (see Figure 36).

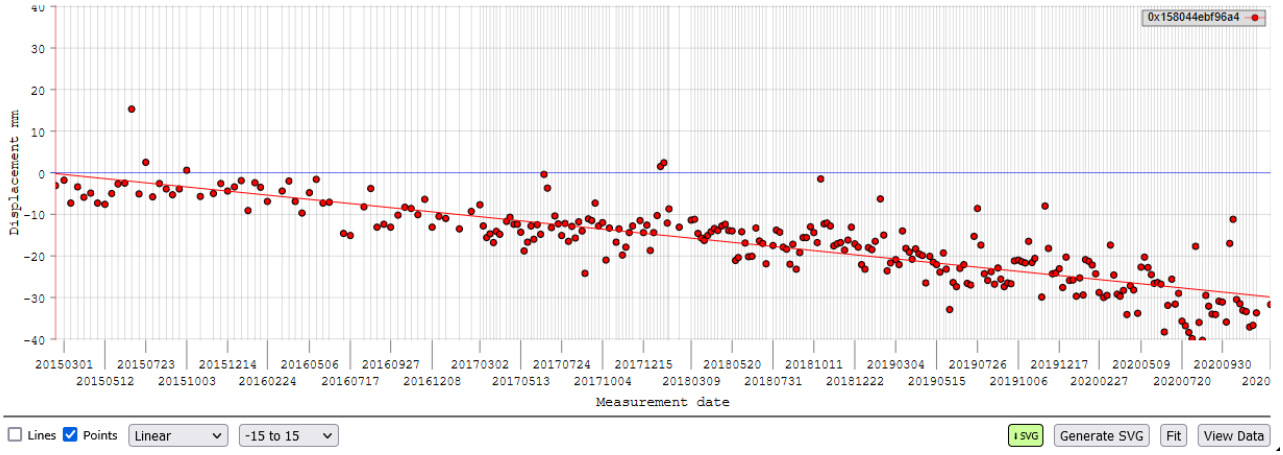


Figure 36 Example InSAR time-series plot. Each point relates to a SAR acquisition and all together they reveal the overall evolution of motion for that measurement point during the time period spanned by the dataset under analysis

Wide area processing vs local analyses

An important fact which should not be neglected when working with InSAR measurements obtained from Wide Area Processing (WAP) is that they are the result of a processing specifically *designed for wide areas*. Processing parameters are carefully tuned to meet project requirements, including those about computational time and memory allocation. These constraints, together with obvious limits on manual quality checks when dealing with *millions* of MPs, creates a differentiation between *local* InSAR analyses customised to a specific application, and WAP results. For instance, in local analyses, the thresholds on phase coherence used to identify MPs are usually set to lower values, since manual interventions can then fix possible phase unwrapping errors [RD1] and/or remove some points that appear as statistical outliers to the processing operator. Therefore, it is not impossible that an *ad hoc* processing of the same dataset used to generate a WAP result but limiting the area of interest to a few tens of square kilometres, to identify different MPs coverages and densities.

References:

- Bamler, R. and Hartl P. (1998). Synthetic Aperture Radar Interferometry. Inverse Problems, 14, R1-R54.
- Dzurisin, D. (2006). Volcano Deformation. Springer. ISBN 3-540- 42642-6
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D. (2007a). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publications, TM-19. ISBN 92-9092-233-8. Available at: http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications
- Ferretti, A. (2014), Satellite InSAR Data, EAGE Publications, ISBN 9073834716.
- Hanssen, R.F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-6945-9
- Rosen, P., Hensley S., Joughin I., Li F., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceedings of the IEEE, 88(3), 333-382

7. TERMS OF USE

The Copernicus programme is governed by Regulation (EU) No 2021/696 of the European Parliament and of the Council of 28 April 2021 establishing the Union Space Programme and the European Union Agency for the Space Programme and repealing Regulations (EU) No 912/2010, (EU) No 1285/2013 and (EU) No 377/2014 and Decision No 541/2014/EU. Within the Copernicus programme, a portfolio of land monitoring activities has been delegated by the European Union to the EEA. The land monitoring products and services are made available through the Copernicus land portal on a principle of full, open and free access, as established by the Copernicus data and information policy Regulation (EU) No 1159/2013 of 12 July 2013.
The Copernicus data and information policy is in line with the EEA policy of open and easy access to the data, information and applications derived from the activities described in its management plan.

8. SUPPORT AND HELP DESK

Product technical support is provided by the product custodian through Copernicus Land Monitoring Service helpdesk at copernicus@eea.europa.eu. Product technical support doesn't include software specific user support, data interpretation or general GIS or remote sensing support.

ANNEX

Table 3 Possible applications of EGMS products for Geohazards

Geohazards	Users	Action	Relevant products
Subsidence	• Energy companies • Urban planning offices • Insurance companies • Military • Cargo and logistic companies • Transport companies • Industry • Estate Agents • Public authorities • Civil Protection	• Construction • Deconstruction • Monitoring • Planning • Risk assessment • Appraisal management	• *Basic* • *Calibrated* • *Ortho*
Landslides	• Urban planning offices • Insurance companies • Transport companies • Industry • Public authorities • Civil Protection	• Construction • Deconstruction • Monitoring • Planning • Risk assessment • Appraisal management	• *Basic* • *Calibrated* • *Ortho*
Earthquake	• Aid organizations • Public authorities • Military • Healthcare • Urban planning offices • Insurance companies • Civil Protection	• Assessing • Help management • Risk assessment • Damage mapping	• *Calibrated* • *Ortho*
Volcanic Activity	• Aid organizations • Public authorities • Military • Healthcare • Urban planning offices • Insurance companies • Civil Protection	• Monitoring • Help management • Risk assessment • Damage mapping	• *Calibrated* • *Ortho*

Table 4 Possible applications of EGMS products for Civil Engineering & Infrastructure

Civil Engineering & Infrastructure	Users	Action	Relevant products
Buildings	• Urban planning offices • Insurance companies • Estate agents • Civil engineering and construction companies • Engineering consultancy companies • Energy supplier	• Construction • Expansion • Renovation • Teardown • Maintenance • Monitoring	• *Basic* • *Calibrated*

Roads	• Urban planning offices • Business enterprise • Road departments • Transport companies • Logistic companies • Toll companies • Tourism sector • Engineering design companies • Insurance companies	• Design • Construction • Expansion • Renovation • Maintenance • Monitoring	• *Basic* • *Calibrated*
Tunnels	• Highway and Railway companies • Insurance companies • Design and Construction companies	• Construction • Expansion • Maintenance • Monitoring	• *Basic* • *Calibrated*
Bridges	• Urban planning offices • Road departments • Transport companies • Logistic companies • Toll companies • Tourism sector • Asset managers • Insurance companies	• Design • Construction • Expansion • Change detection • Maintenance • Monitoring	• *Basic* • *Calibrated*
Railways	• Railway companies • Urban planning offices • Insurance companies • Civil engineering and construction companies • Engineering consultancy companies	• Design • Construction • Expansion • Maintenance • Deconstruction • Recommissioning • Monitoring	• *Basic* • *Calibrated*
Airports	• Airline companies • Military • Transport companies • Government agencies • Civil engineering and construction companies • Engineering consultancy companies	• Design • Construction • Expansion • Maintenance • Deconstruction • Monitoring • Planning	• *Basic* • *Calibrated* • *Ortho*
Ports	• Port operators • Shipping companies • Shipyards • Cargo and logistic companies • Transport companies • Industry • Tourism industry • Energy supplier	• Design • Construction • Expansion • Maintenance • Deconstruction • Monitoring • Planning	• *Basic* • *Calibrated*

Table 5 Possible applications of EGMS products for Energy & Natural Resources

Energy & Natural Resources	Users	Action	Relevant products
Oil & Gas	• Energy suppliers • Industry • Military • Environmental agencies • Cargo and logistic companies	• Construction • Maintenance • Deconstruction • Planning	• *Basic* • *Calibrated*
Power Plants	• Energy companies • Military • Society	• Construction • Maintenance • Deconstruction • Monitoring • Planning	• *Basic* • *Calibrated*
Wind Farms	• Energy companies • Agriculture sector • Urban planning offices	• Construction • Maintenance • Deconstruction • Monitoring • Planning	• *Basic* • *Calibrated*
Power Lines	• Energy companies • Urban planning offices • Military • Society	• Construction • Maintenance • Deconstruction • Monitoring • Planning	• *Basic* • *Calibrated*
Dams	• Urban planning offices • Road departments • Transport companies • Energy supplier • Society • Insurance companies	• Construction • Maintenance • Deconstruction • Monitoring • Planning	• *Basic* • *Calibrated*
Mining	• Energy companies • Mining companies • Risk managers and civil protection	• Mining • Closure • Opening • Excavations • Planning	• *Calibrated* • *Ortho*

Table 6 Possible applications of EGMS products for Cultural Heritage

Cultural Heritage	Users	Action	Relevant products
Heritage management	• Government • Municipalities • Archaeologist • Cultural heritage organisations • No-profit organisations	• Maintenance • Monitoring	• *Basic* • *Calibrated* • *Ortho*





Land Subsidence and its Mitigation

Giuseppe Gambolati and Pietro Teatini

THE GROUNDWATER PROJECT

Land Subsidence and its Mitigation

The Groundwater Project

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Giuseppe Gambolati

Professor Emeritus,
School of Engineering,
University of Padova
Padua, Veneto, Italy

Pietro Teatini

Associate Professor,
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering,
University of Padova
Padua, Veneto, Italy

Land Subsidence and its Mitigation

The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

All rights reserved. This publication is protected by copyright. No part of this book may be reproduced in any form or by any means without permission in writing from the authors (to request permission contact: permissions@gw-project.org↗). Commercial distribution and reproduction are strictly prohibited.

GW-Project works can be downloaded for free from gw-project.org↗. Anyone may use and share gw-project.org↗ links to download GW-Project's work. It is not permissible to make GW-Project documents available on other websites nor to send copies of the documents directly to others. Kindly honor this source of free knowledge that is benefiting you and all those who want to learn about groundwater.

Copyright © 2021 Giuseppe Gambolati and Pietro Teatini (The Authors)

Published by the Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2021.

Gambolati, G., and Teatini, P.

Land Subsidence and its Mitigation / Giuseppe Gambolati and Pietro Teatini - Guelph, Ontario, Canada, 2021.

92 pages

ISBN: 978-1-77470-001-3

Please consider signing up to the Groundwater Project mailing list and stay informed about new book releases, events and ways to participate in the Groundwater Project. When you sign up to our email list it helps us build a global groundwater community. Sign-up↗.

Topic Leads: John Cherry

Board: John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira and Eileen Poeter

Steering Committee: Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Yin Fan Reinfelder, Warren Wood and Yan Zheng.

Cover Image: Photos showing consequences of land subsidence and ground ruptures due to groundwater pumping. Top: the seafront of Pluit district, Jakarta in Indonesia, sited a few meters below the sea level and protected by the seawater through a concrete wall that needs to be raised every few years to counteract a land subsidence of 10-20 cm/year due to aquifer overexploitation (photo by Pietro Teatini, September 20, 2019). Bottom: a large earth fissure system at Siphon Draw, Apache Junction, Arizona, USA due to deformation of aquifer system accompanying groundwater pumping (photo by Pietro Teatini, November 6, 2019).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Dedication

The first author dedicates this effort to his four granddaughters Gaia, Cloe, Gioia and Iris. The second author dedicates this effort to his wife Sabrina and sons, Alberto and Michele.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Table of Contents

DEDICATION ..... **IV**
TABLE OF CONTENTS ..... **V**
THE GROUNDWATER PROJECT FOREWORD ..... **VI**
FOREWORD ..... **VII**
PREFACE ..... **VIII**
ACKNOWLEDGEMENTS ..... **IX**
1 INTRODUCTION **1**
1.1 General Concepts and Principles 1
1.2 Historical Framework 7
1.3 Occurrence 10
1.4 Major Environmental Impacts 14
2 THEORY OF 1-D SOIL CONSOLIDATION AND AQUIFER RESPONSE TO PUMPING **15**
2.1 Effective Intergranular Stress and Soil Parameters 16
2.2 Pumping from a Water Table Aquifer 20
2.3 Pumping from a Single Confined Aquifer 21
2.4 Pumping from a Multi-aquifer System 23
2.5 Delayed Compaction of Aquitards (Confining Beds) 24
2.6 Time Factor and Compaction Profile 27
3 MEASURING AND MONITORING SUBSIDENCE AND COMPACTION **29**
3.1 Spirit Leveling 30
3.2 Global Navigation Satellite Systems 31
3.3 InSAR 32
3.4 Borehole Extensometer 36
3.5 Fiber Optics 38
4 MITIGATION OF LAND SUBSIDENCE BY WATER INJECTION **39**
5 GEOMECHANICAL PROCESSES RELATED TO ANTHROPOGENIC LAND SUBSIDENCE **44**
5.1 Ground Ruptures 46
5.2 Induced Seismicity 50
6 EXAMPLE OF ANTHROPOGENIC LAND SUBSIDENCE CALCULATION **53**
7 CONCLUSIONS **58**
8 EXERCISES **60**
Exercise 1 60
Exercise 2 61
Exercise 3 62
9 REFERENCES **63**
10 BOXES **77**
Box 1 Justification of Terzaghi's Principle 77
Box 2 Visualization of Relationship between Effective Stress and Void Ratio 78
Box 3 3-D Poroelasticity Equations 80
11 EXERCISE SOLUTIONS **87**
Exercise 1 Solution 87
Exercise 2 Solution 88
Exercise 3 Solution 89
ABOUT THE AUTHORS **91**

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

The Groundwater Project Foreword

The United Nations theme for World Water Day on March 22, 2022, is "Groundwater: making the invisible visible." This aligns with the essence of the Groundwater Project (GW-Project), which is aimed at raising groundwater consciousness and strengthening groundwater expertise worldwide, and is being accomplished by publishing books and supporting materials about "all-things-groundwater".

The GW-Project, a non-profit organization registered in Canada in 2019, is committed to contribute to advancement in education and brings a new approach to the creation and dissemination of knowledge for understanding and problem solving. The GW-Project operates the website https://gw-project.org↗ as a global platform for the democratization of groundwater knowledge and is founded on the principle that:

"Knowledge should be free and the best knowledge should be free knowledge." Anonymous

The mission of the GW-Project is to provide accessible, engaging, high-quality, educational materials, free-of-charge online in many languages, to all who want to learn about groundwater and understand how groundwater relates to and sustains ecological systems and humanity. This is a new type of global educational endeavor in that it is based on volunteerism of professionals from different disciplines and includes academics, consultants and retirees. The GW-Project involves many hundreds of volunteers associated with more than 200 organizations from over 14 countries and six continents, with growing participation.

The GW-Project, which began publishing books in August 2020, is an ongoing endeavor and will continue with hundreds of books being published online over the coming years, first in English and then in other languages, for downloading wherever the Internet is available. The GW-Project publications also include supporting materials such as videos, lectures, laboratory demonstrations, and learning tools in addition to providing, or linking to, public domain software for various groundwater applications supporting the educational process.

The GW-Project is a living entity, so subsequent editions of the books will be published from time to time. Users are invited to propose revisions.

We thank you for being part of the GW-Project community. We hope to hear from you about your experience with using the books and related materials. We welcome ideas and volunteers!

The GW-Project Steering Committee

July 2021

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Foreword

Fresh groundwater resources provide many benefits to humanity and ecological systems, but pumping water from aquifers often has problematic consequences. One such consequence is subsidence of the land surface in urban areas caused by compaction of the low-permeability clay or silt beds that overly, underly or occur within the pumped aquifer, which is the subject of this book. The compaction occurs because the porosity of clay and silt beds decreases as the pore-water pressure declines. The aquifer provides the water while the low permeability beds cause the problem of compaction-induced subsidence of the land surface.

People living on the subsiding land do not sense that their land surface is changing position as when earthquakes occur. Substantial subsidence occurs over a period of years or decades, but the municipal engineers see subsidence effects early because slight subsidence begins to cause water problems due to changes in the slope of streets, ditches and sewer lines such that rainfall cannot escape as before. Areas where substantial subsidence causes problems are a small fraction of the global area in which aquifers have been heavily pumped because most low-permeability beds associated with aquifers are not porous enough to undergo large decreases in porosity. However, a substantial fraction of the global population lives in cities where subsidence is problematic and increasing. This is because the geology of aquifer systems most prone to compaction and subsidence are situated along coasts, especially where rivers discharge to the ocean. This geographical setting typically has thick soft, exceptionally porous deposits of young geological age so that minimal compaction has occurred over geological time, which makes human induced compaction likely. This geological setting exists where most of the world's expanding megacities are located including Alexandria, Bangkok, Dhaka, Ho Chi Minh City, Houston, Jakarta, Lagos, New Orléans, Rotterdam and Shanghai. Land subsidence is one of the world's underrated problems with consequences exacerbated by sea level rise as the climate changes.

The two authors of this book, Beppe Gambolati and Pietro Teatini, are distinguished professors in Italy and it is fitting that this book comes from Italy where the magnificent City of Venice has been recognized globally for its land subsidence problem for centuries. Although subsidence is primarily a result of groundwater pumping, the quantitative study of subsidence now resides in the discipline of geotechnical engineering and soil mechanics, which is where these book authors are founded and have global experience concerning subsidence problems.

John Cherry, The Groundwater Project Leader

Guelph, Ontario, Canada, June 2021

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Preface

Land subsidence, that is, the loss of land elevation, is a major geomechanical process that threatens viability and sustainable development of many millions of people throughout the world, especially in, but not restricted to, coastal and highly urbanized areas. The most severe cases of land subsidence are associated to groundwater overdraft. Unfortunately, the unsustainable use of land and water resources is expected to increase in the next few decades, mainly in developing countries of Asia and Africa. The effects of climate change in terms of sea level rise, variation in the distribution and timing of precipitation, runoff and aquifer recharge will be compounded by an increasing concentration of population in (mega-) cities and elsewhere along the coasts of the world. The expanding need for freshwater resources in more and more concentrated, at-risk, areas will inevitably lead to an increase of sites affected by land subsidence, with a growing number of people involved.

Almost one century has passed since scientists started to investigate land subsidence of anthropogenic origin. Impressive progress has been made in terms of: a) recognizing the basic hydrologic and geomechanical principles; b) measuring aquifer compaction and ground displacements, in both the vertical and horizontal directions; c) modeling historic and simulating predicted future events; and, d) mitigating environmental impact through aquifer recharge and/or surface water injection.

This book addresses anthropogenic land subsidence, the most widespread and studied geomechanical response to groundwater pumping. A historical review is followed by a description of the major areas that have experienced considerable land subsidence illustrating a selection of the major environmental impacts. The main factors controlling the process and the basic principles and equations underlying it are discussed, with reference to the most relevant soil stresses and properties. Pumping from water table, confined and complex aquifer systems is outlined. Compaction of low permeability formations (aquitards) along with time-factor and compaction profiles are analyzed. The most advanced tools for recording and monitoring in situ deformation and surface displacements are mentioned. The occurrence opposite to land settlement, that is, the upheaval of land surface induced by aquifer recharge or water injection into the subsurface, is also reviewed. A few processes are mentioned which are still poorly understood, such as the influence of differential vertical compaction, horizontal displacements, and discontinuity in the bedrock on near-surface ground ruptures, fissure generation and fault reactivation including induced seismicity. Finally, the discussion focuses on the connection between research into groundwater geomechanics and the present challenges to be met in undertaking effective remedial measures aimed at mitigating the associated environmental and socio-economic impact.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Acknowledgements

The first author is indebted to R. Allan Freeze for introducing him to the issue of groundwater modeling, with special reference to groundwater pumping and related anthropogenic land subsidence in Venice, Italy.

We deeply appreciate the thorough and useful reviews of and contributions to this book by the following individuals:

- William Woessner, University of Montana, USA;
- Herb Wang, University of Wisconsin, USA; and,
- Tomo Tokunaga, The University of Tokyo, Japan.

The author and editors are grateful for the oversight of Amanda Sills and copyediting of Elhana Dyck, both of the Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada; and Eileen Poeter (Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA) for reviewing, editing and producing this book.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

1 Introduction

Land subsidence is a sudden or gradual settling of the land surface caused by changes in the stress regime of the structure of subsurface. Subsidence driven by groundwater extraction most commonly occurs when aquifer materials are composed of lenses or layers of fine-grained compressible sediments in which pore-water heads are lowered causing sediment compaction. This reduction in volume results in a lowering of the land surface. Injecting water into aquifer systems has sometimes mitigated this anthropogenic subsidence; however, compaction of fine-grained sediments is not completely reversible in most cases. Land subsidence can be a major geomechanical consequence of groundwater withdrawal and results in:

- lowering of the elevation of the ground surface, that is, land subsidence, as a result of aquifer overdraft;
- formation of earth fissures caused by groundwater pumping in subsiding basins, especially in arid and semiarid regions;
- activation of pre-existing shallow faults, creating a failure of the land surface; and,
- induction or triggering of micro-seismic and seismic events because of changes in the natural stress regimes.

Additional impacts can also occur when aquifers experiencing subsidence are naturally recharged or attempts to stabilize or reverse groundwater related land subsidence by injecting water into the aquifers occurs. Upheaval of the ground surface has been observed in a number of areas as shown later in this book.

1.1 General Concepts and Principles

The mechanism by which rock and sediments deform and compact under the influence of a change in pore water pressure is well understood. In aquifer systems the total geostatic load acting on the aquifer and confining beds is balanced by the pore water pressure and the effective vertical and horizontal stresses (Figure 1). When an aquifer is pumped, pore water pressure can no longer support as large a percentage of the load from overlying formations. Therefore, more of this load must be borne by the grain-to-grain contacts (effective stress) of the geological material itself, with a stress transfer from the fluid to the solid phase. This increase in effective stress develops in both the pumped units and the adjacent formations (that is, intervening aquitards and confining beds) that compact. The amount of compaction is primarily related to the compressibility of the compacting layers. The resulting cumulative compaction of subsurface layers extends its effect to the ground surface, which therefore subsides (Figure 2). Pore-water pressure also can increase when water is added to an aquifer by natural recharge or injection. In some settings this may partially reverse, or mitigate, subsidence.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

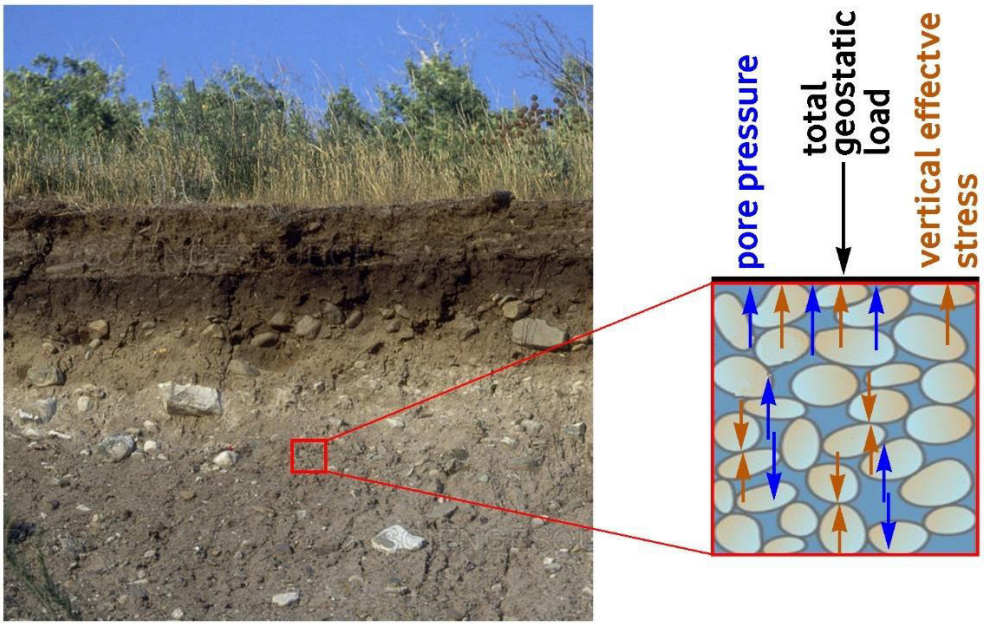


Figure 1 - The total geostatic load is supported by the vertical effective stress (in red) and the pore water pressure (in blue).

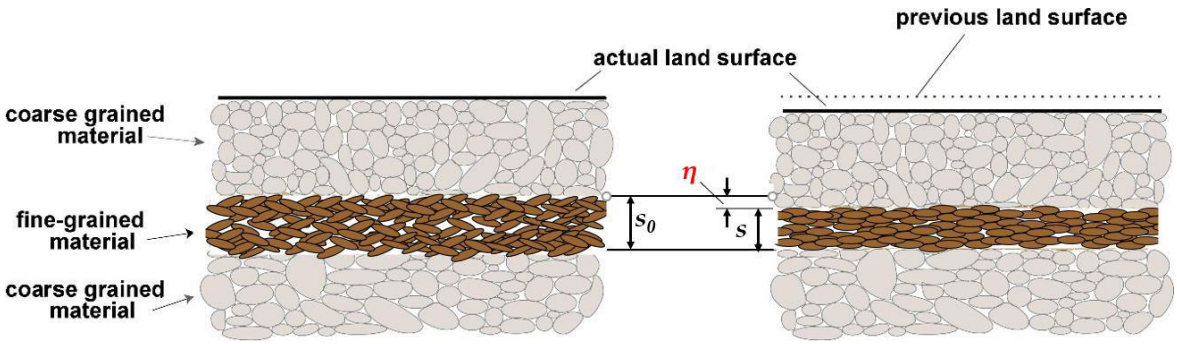


Figure 2 - Soil compaction η with a reduction of the porous space (grains are incompressible for all practical purposes).

The introduction of a pumping well into a natural fluid flow system produces a disturbance that propagates its effect in space and time through the geological medium. Around the well, a fluid head cone of depression develops and expands laterally, and to a minor extent also vertically (Figure 3). The magnitude and timing of the head drop caused by pumping depends on the distance between the well and the point of observation, the geometric, geologic configuration and boundaries of the subsurface basin and the geomechanical properties of both the fluid and formation: specifically, fluid density and viscosity and intrinsic medium permeability, porosity, and compressibility (Figure 4).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

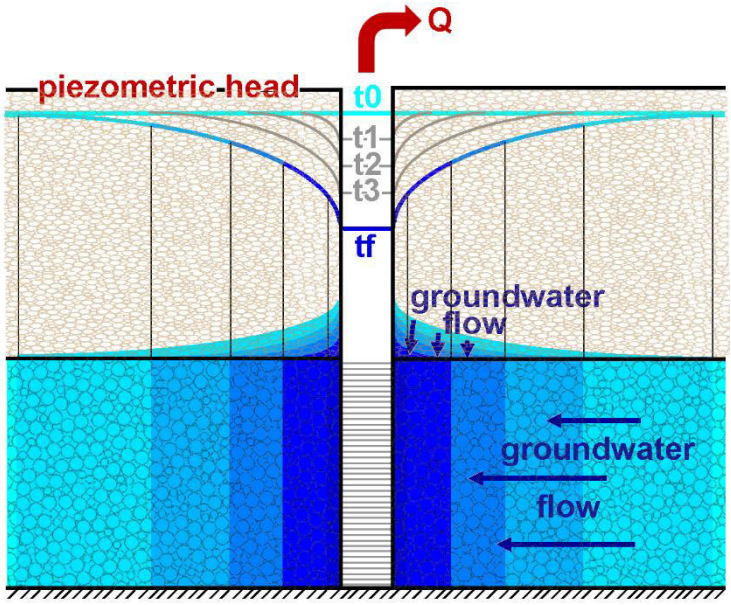


Figure 3 - Groundwater withdrawal from a well causes piezometric head decline in the pumped aquifer (darker blue represents lower head) and, to a lesser extent in the overlying fine-grained sediments. The piezometric head declines over time from the initial time (t0) level to the final time (tf) coned-shaped distribution.

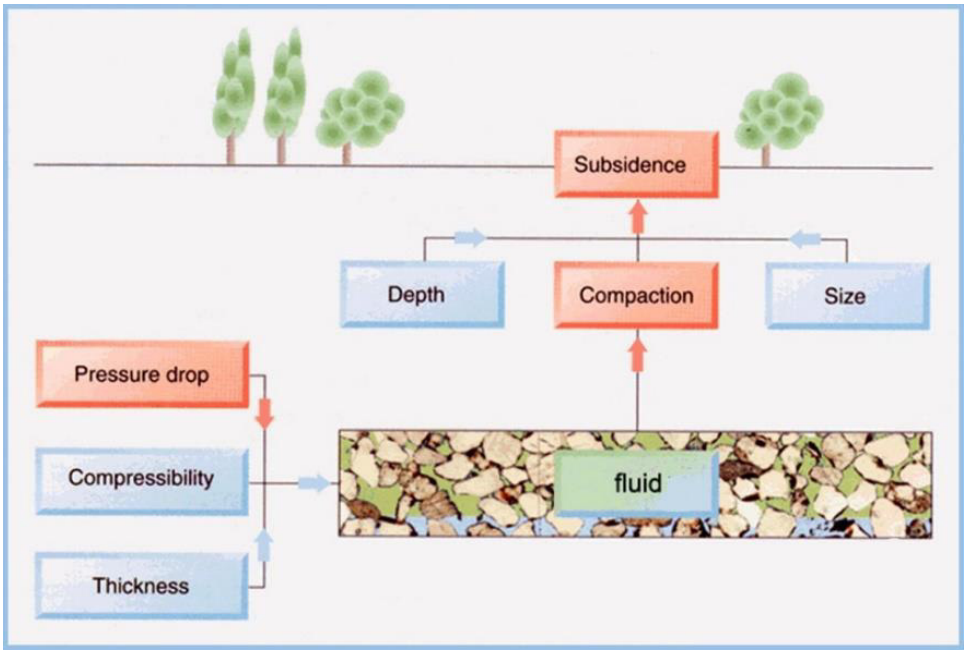


Figure 4 - Main factors controlling land subsidence due to subsurface fluid removal are the magnitude of the reduction of pore water pressure in the pumped strata and its thickness and compressibility that control the resulting amount of compaction; then the depth and extent of the compacted material influences the magnitude and distribution of subsidence at the surface. When compaction is deep and of limited lateral extent, surface subsidence is less than when compaction is shallow and wide spread.

When a porous body experiences a change in the internal flow and stress fields, due, for example, to a sedimentation process producing a total stress increase, or to fluid pumping which causes a decrease in pore pressure, the incremental effective stress and the

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

fluid-dynamic gradient that develop are intimately connected. This connection was first recognized by Biot (1941), who developed the coupled theory of consolidation (and hence the coupled theory of land subsidence) where flow and stress are intimately. It states that fluid flow influences the porous medium's deformation, which in turn affects the flow field. Groundwater hydrologists, who are mainly concerned with the fluid-dynamic aspects of this coupled interrelation, have advanced the uncoupled theory of flow, based on the so-called diffusion equation. Theis (1935) solved the single-phase flow of groundwater by incorporating the rock structural properties into a lumped geomechanical parameter (that is, the elastic storage coefficient S_s defined in the next section). Theis' solution to the diffusion equation is calculated separately, independently of the medium structural solution, in order to provide the pore pressure distribution. Once obtained, the pore pressure is used as the external driving force in predicting the medium deformation with a geomechanical model: in particular, the vertical displacement at the ground surface, that is, land subsidence.

Land subsidence has been documented to occur during some deep oil and gas reservoir pumping and during groundwater extraction. Let us compare anthropogenic land subsidence over gas/oil fields to that occurring over multi-aquifer systems. Due to stress/strain redistribution in the thick overburden separating the reservoir from the earth's surface, settlement above gas/oil fields is typically less than reservoir compaction, but it spreads over an area extending beyond the field itself (Figure 5a).

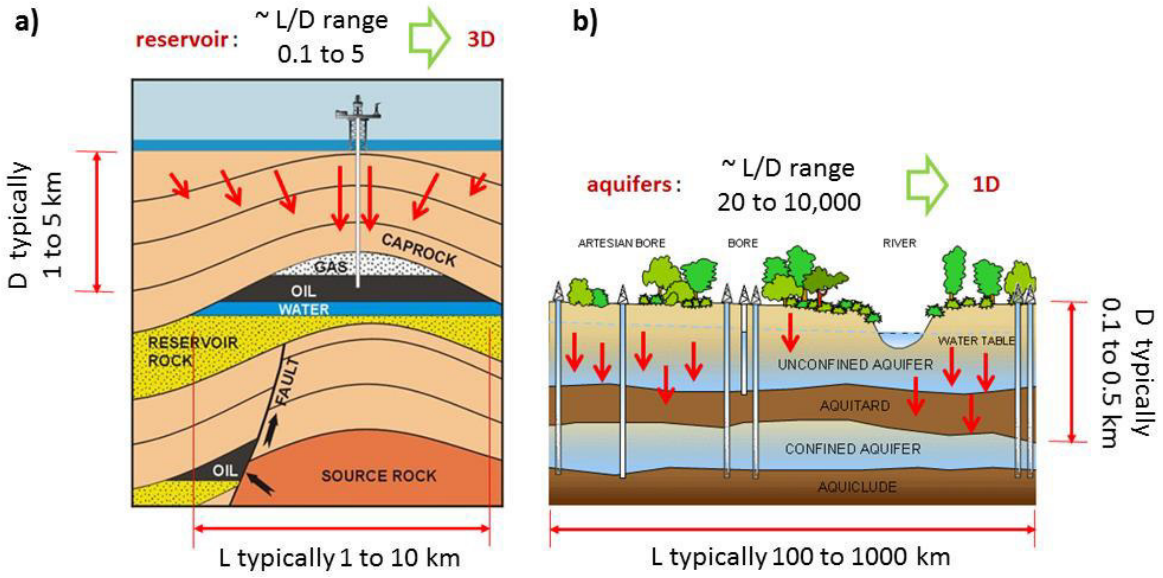


Figure 5 - Character of surface subsidence caused by fluid pumping from the subsurface. a) Oil/gas withdrawal: because of the typically large depth *D* relative to the areal extent *L*, that is, a relatively small ratio *L*/*D*, the displacement field (red arrows) caused by hydrocarbon production is three-dimensional. b) Groundwater pumping from an aquifer generally occurs from wells distributed over an area much larger than the aquifer depth, that is, *L*/*D* is large. Consequently, the displacement field is predominantly one-dimensional, along the vertical direction.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Conversely, aquifer systems are generally shallower and have a much larger areal extent than gas/oil fields. In these systems, sediment compaction is not contrasted by overlaying deposits and simply migrates to the ground surface. Hence, such stratified systems behave mechanically as if they were one-dimensional (1-D) structures, and, although fluid flow may be three-dimensional (3-D) (to give a simple example, vertical in the confining beds and aquitards, and horizontal in the aquifers), land displacement occurs mostly in the downward vertical direction (Figure 5b).

In addition to dimensionality, other factors differentiate the mechanism of gas/oil field compaction from that of aquifer/aquitard compaction. Usually, both subsurface environments consist of a sequence of sands and clays or sandstones and shales. Sandstones are cemented sands, whereas shales are clays that have undergone extensive mineralogical changes in the burial process associating them with hydrocarbon-bearing strata. These changes may have profoundly affected the shales' compaction properties. Most freshwater aquifer systems are normally consolidated and normally pressurized, or only slightly over-pressurized, and may lack important faults due to the typical formation mechanism involving a depositional alluvial/marine environment without significant interfering tectonic movements. However, their geomechanical simplicity may be partially offset by a litho-stratigraphic complexity related to the distribution of clayey, silty, and sandy soils within the compacting system. It is well known that clay may be up to two orders of magnitude more compressible than sand at shallow depth (Chilingarian and Knight, 1960). Hence, land subsidence of a freshwater system highly depends on the distribution of the clayey and silty fraction within confining beds, intervening aquitards, and interbedded lenses. Moreover, drainage from these beds can lag behind drainage from the producing sand, thus causing a delayed land subsidence which may manifest itself after wells shut down (Figure 6). In contrast, in deeply seated gas/oil fields, clay (shale) and sand (sandstone) tend to exhibit the same mechanical properties irrespective of lithology (Finol and Sancevic, 1995; Baú et al., 2002; Ferronato et al., 2013), which further differentiates the magnitude and extent of subsidence above pumped aquifer systems and productive gas/oil fields.

Conceptually, four factors may combine to produce measurable aquifer settlement records:

1. shallow burial depth of the pumped formations;
2. highly compressible deposits laid down in alluvial or shallow marine or lacustrine environments;
3. considerable pore pressure decline; and,
4. large thickness of the depressurized water-bearing strata.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

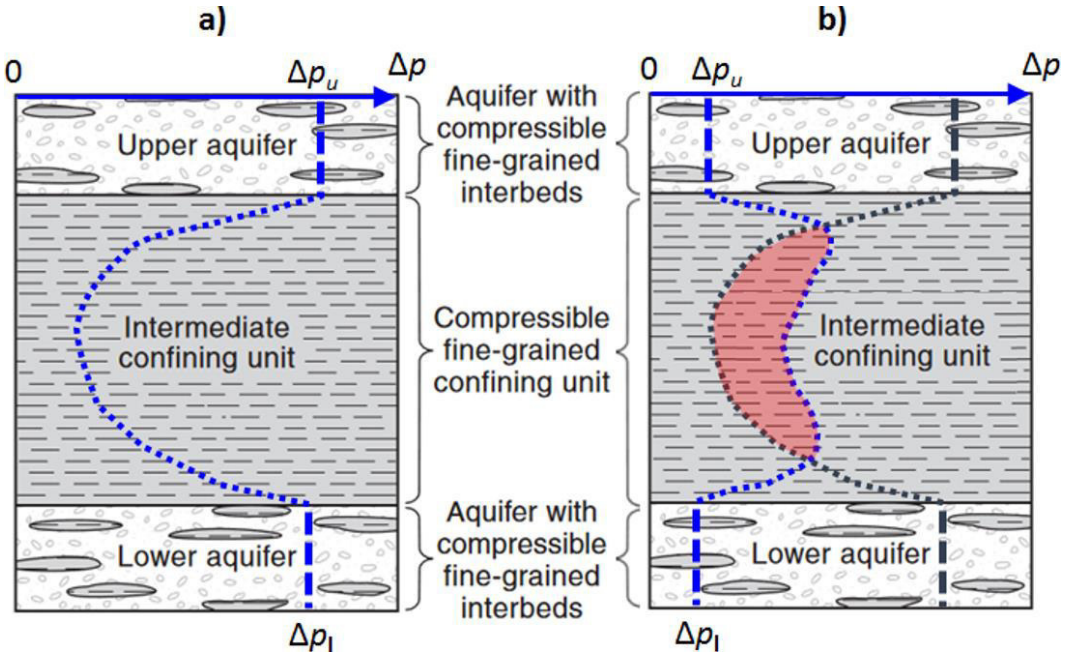


Figure 6 - Pore pressure depletion (blue dashed lines) in two aquifers and the intervening aquitard a) at the end of groundwater pumping and b) at some time after the well shutdown. The red-hatched zone represents the portion of the confining aquitard experiencing pressure decline after the well closure, that is, causing delayed subsidence.

Unless the aquifers are over-pressurized, factors 1 and 3 are mutually exclusive, while they can both be associated with factors 2 and 4. For a large subsidence to occur, however, a soft compacting deposit is needed, and/or a large pressure decline. To give a few examples, Mexico City sank by 10 m with a maximum pressure decline of only 0.7 MPa because of the extremely soft high-porosity soils of the compacting shallow formations located within the upper 50 m (Rivera et al., 1991). Settlements of 9 m and 6.7 m were reported from the Wilmington (Rintoul, 1981) and Ekofisk (Hermansen et al., 2000; Zaman et al., 1995) oil fields in California, USA, and the North Sea, Europe, respectively. These large settlements were due to the pronounced pore pressure drop (exceeding 20 MPa in the latter) combined with the considerable thickness of the compacting units. Although land subsidence above hydrocarbon fields is outside the scope of this book, it is perhaps worth mentioning that at Ekofisk the reservoir rock exhibited a sudden increase in compressibility at some stage of the field development, with a large irreversible deformation defined as "pore collapse", believed to be the main reason for the unexpected large settlement over the field (Zaman et al., 1995).

Some aquifers may be over-consolidated (Holzer, 1981). Over-consolidation tends to reduce the early subsidence rate and then generate a sudden unexpected growth at some stage of extraction when the effective stress exceeds the pre-consolidation stress. If the water- or gas/oil-bearing sediments are pre-consolidated it may be very difficult to predict anthropogenic land subsidence prior to the field/aquifer development. A pre-consolidation effect might have been caused in the geological past by uplift followed by erosion of the sediments overlying the fluid-bearing layers, by fluid overpressure, or both (Maltman,

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

1994). When pore pressure drops due to fluid removal, a reloading of the pumped formations takes place. Initially, compaction is slight, and thus, land settlement is also slight. However, as soon as the maximum experienced load is surpassed, rock compression occurs on the virgin loading curve with a sudden increase in compressibility and subsidence rate. Another factor that may influence the process is the presence of faults within the developed system and the overburden, as in the case of Las Vegas, NV, USA (Amelung et al., 1999). Faults may weaken the porous medium structure and make both analysis and prediction more difficult.

For the sake of completeness, we should mention other types of anthropogenic land subsidence that are not addressed by the present analysis. Most of them are less important in terms of socio-economic and environmental impact. They include underground mining, carbonate rock solution, subsurface erosion, surface loading, land drainage and reclamation, histosoil (peat) oxidation, dissolution of soil carbon and water application (Allen, 1984). An example of land subsidence due to peat oxidation is presented by Zanello et al. (2011).

1.2 Historical Framework

The first observation relating land subsidence to subsurface fluid removal was made in 1926 by the American geologists Pratt and Johnson (1926), who discussed land settlement on the Gaillard peninsula, in the center of Goose Creek Oil Field on Galveston Bay (Texas). They concluded that "*the Goose Creek subsidence was directly caused by the extraction of oil, water, gas, and sand from beneath the surface beginning in the year 1917*". They also made a conjecture concerning the mechanism governing the underlying process, postulating that "*the pore spaces are occupied by water draining more slowly from the adjacent clays; and it is a well-known fact that the draining of clays causes them to become more compact, and this in turn would permit subsidence of overlying surface*". However, a few years earlier, Fuller (1908) had already theorized that fluid withdrawal and a decrease in fluid pore pressure caused the sinking of the land surface because of the removal of hydrostatic support.

It is interesting to note how the general public's perception of anthropogenic land subsidence has drastically changed over time. Today the occurrence of settlement affecting large areas is a matter of great concern from a variety of viewpoints involving economic, environmental, and safety issues. In regions where ground sinking is caused by both groundwater pumping and hydrocarbon production, we may often see one party unload responsibility onto another. In the 1920s this was not the case, as we see from the poignant example of the Goose Creek oil field. The Gaillard peninsula, located at the mouth of Goose Creek and overlying part of the oil field, began to settle and was soon covered by the waters of San Jacinto Bay. By 1925 maximum subsidence had exceeded one meter and the area affected was about 4 km long and 2.5 km wide, approximately consistent with the boundary of the producing wells (Figure 7). The State of Texas claimed title to the lands

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

submerged by the subsidence and sought to recover the value of oil removed after the submergence. The court, however, decided in favor of the defendants, accepting their contention that the subsidence was not the result of a natural process but generated by an act of man, namely the removal of large volumes of fluids and sand from the underground "*No act of man can operate to deprive another man of his property under the law.*" If the subsidence had been a natural process, "*an act of God*", then presumably title to the submerged land and the underlying reserves would have passed to the state of Texas.

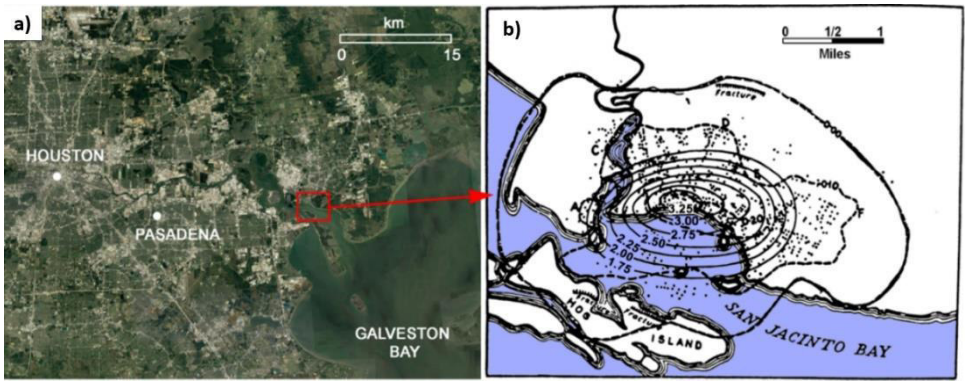


Figure 7 - a) Location of the Goose Creek mouth on the Galveston Bay close to Houston, Texas, USA. b) Land subsidence map (in feet, 100 feet is approximately 30.5 meters; 1 mile is approximately 1.6 kilometers) provided by Pratt and Johnson (1926).

Quantitatively speaking, the principle of effective intergranular stress advanced by Terzaghi (1923) showed soil consolidation as the primary cause of land settlement. Soon, this principle was recognized as being an active factor in the compaction of an aquifer (the Dakota Sandstone) (Meinzer and Hard, 1925), who stated that the overburden pressure of all beds above the confined Dakota aquifer was supported partly by the fluid pressure and partly by the sandstone itself, via the effective intergranular stress. They concluded that the grain-to-grain load had increased by about 50 percent because of the decline of artesian head. Based on both laboratory tests and field measurements, Meinzer (1928) cited evidence indicating the compressibility and elasticity of artesian aquifers. He recognized that water withdrawn from storage was released by compression of the aquifer and by expansion of the water, and that reduction of storage (compression) may be permanent (inelastic) as well as elastic.

Rappleye (1933) provided the first specific records of subsidence due to groundwater pumping in the Santa Clara Valley (California, USA), and Ingerson (1941) described the subsidence in the Delano-Tulare-Wasco (California, USA) area. He presented a map and profiles of land subsidence based on comparison between leveling surveys performed in 1902, 1930, and 1940. By this time the relationship between the removal of subsurface fluid (water, oil, gas) and land subsidence was recognized, at least in the USA.

Jacob (1940) postulated that when water is pumped out from an elastic artesian aquifer system and pore pressure is decreased. As a result, withdrawn water is derived from water expansion, aquifer compression, and compression of the adjacent and

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

intervening clay beds. He stated that the third source is probably the chief one: "*because of the low permeability of the clays (or shales) there is a time lag between the lowering of pressure within the aquifer and the appearance of that part of water which is derived from storage in those clays (or shales)*". Subsequently Lohman (1961) developed an equation for determining the amount of elastic compression of artesian aquifers from known declines in artesian pressure and hydro-mechanical properties of the aquifers. This compression was intended as being transferred to the ground surface, producing an estimate of the resulting land subsidence.

In the late fifties and sixties, the concept interrelating land subsidence and fluid withdrawal was universally accepted thanks to the fundamental contributions by Poland, a pioneer in anthropogenic land subsidence studies (Poland and Davis, 1969). Around the same time the principle of effective stress was universally recognized in geomechanics (Taylor, 1948; Terzaghi and Peck, 1948; Leonards, 1962). By the end of the sixties the concept and the mechanism underlying land subsidence of anthropogenic origin were clear. The way was open to new progress in the mathematical formulation of equations governing the process and corresponding solutions helpful in predicting expected land subsidence in exploited aquifer systems. A pioneering finite element model of the anthropogenic land subsidence of Venice is discussed by Gambolati and Freeze (1973) and Gambolati et al. (1974).

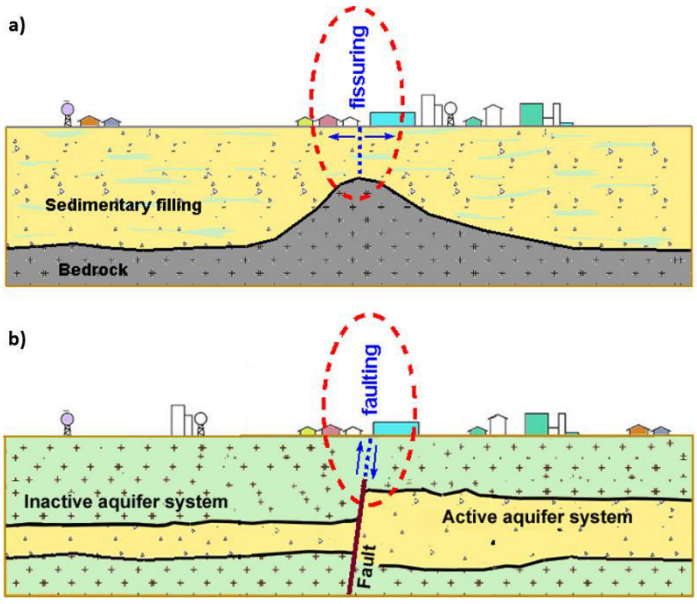


Figure 8 - a) Fissuring and b) faulting due to deformation of aquifer systems accompanying groundwater pumping.

A second important geomechanical effect associated with groundwater pumping from unconsolidated sedimentary aquifer systems is ground rupture. The nature of ground failure may range from fissuring, that is, formation of an open crack, to faulting, that is, differential offset of the opposite sides of the failure plane (Figure 8).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Ground ruptures associated with land subsidence were first observed in 1949, in central Arizona, by Feth (1951). In the wake of this pioneering work, it would take more than 20 years for the United States Geological Survey to undertake major investigations examining earth fissures in subsiding areas of the southwestern United States (California, Arizona, Texas, and Nevada). Holzer and Pampeyan (1981) recognized that "*the areal and temporal association of earth fissures with land subsidence caused by groundwater withdrawal indicated that these fissures were man induced*". The underlying mechanism was highlighted at that time, as soon as enough field data became available to test the hypothesis. Bending caused by localized differential displacements was originally proposed by Feth (1951) to explain the observed fissuring. He speculated that it might have been caused by extensional strains generated by locally varying degrees of subsidence. He attributed the differential subsidence to abrupt variations in aquifer thickness. Lofgren (1971) suggested that horizontal displacements measured in subsiding areas might be due to horizontal seepage forces. Based on the association of earth fissures with water table decline and other field evidence suggesting fissures formed at depth and propagated upward, Holzer and Davis (1976) held that fissures were caused by desiccation due to water table lowering. Over the last decade, the availability of three-dimensional geomechanical models has allowed for preliminary attempts at simulating ground ruptures as they relate to anthropogenic alterations in the porous medium stress state. Modeling suggests that primary controls are reactivation of a preexisting fault, differential compaction due to variations in thickness of aquifer/aquitard layers constituting the aquifer system, and tensile fracturing above bedrock ridges that form the base of the aquifer system.

1.3 Occurrence

Land subsidence is perhaps the most widespread and threatening geomechanical consequence of groundwater pumping. When groundwater withdrawals occur in densely populated and highly developed areas underlain by unconsolidated geological basins of alluvial, lacustrine or shallow marine origin, formed typically, although not exclusively, in the Quaternary period land subsidence is likely. Areas located close to the sea or a lagoon or delta are often impacted by subsidence. Quite often, especially at the onset of the occurrence, land settlement goes unnoticed, only to be discovered later on, when severe damage has already taken place. At this stage, undertaking effective remedial measures to mitigate the associated environmental and socio-economic impact may prove tremendously expensive. However, in recent times our awareness concerning the damage threatened by potential anthropogenic land subsidence has significantly grown at both the political and the general public level, thus contributing to lower the alarm threshold. As a major result, the most recent plans for subsurface resource development usually include a study of the related environmental impact presenting, wherever appropriate, numerical predictions of the expected land settlement above (and close to) the exploited system.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Figure 9 shows the areas of major anthropogenic land subsidence due to groundwater extraction worldwide. Table 1 gives the most significant records of the occurrences depicted in Figure 9. The maximum recorded land settlement of all time amounts to more than 14 m and was due to geothermal water production at Wairakei geothermal field, New Zealand (Allis et al., 2009) as shown in Figure 10a. However, settlement depths approaching 10 m are not unusual as in the San Joaquin Valley, California, USA (Galloway and Riley, 1999) and as shown in Figure 10 for Mexico City, Mexico (Cabral-Cano et al., 2008; Otiz-Zamora and Ortega-Guerrero, 2010).

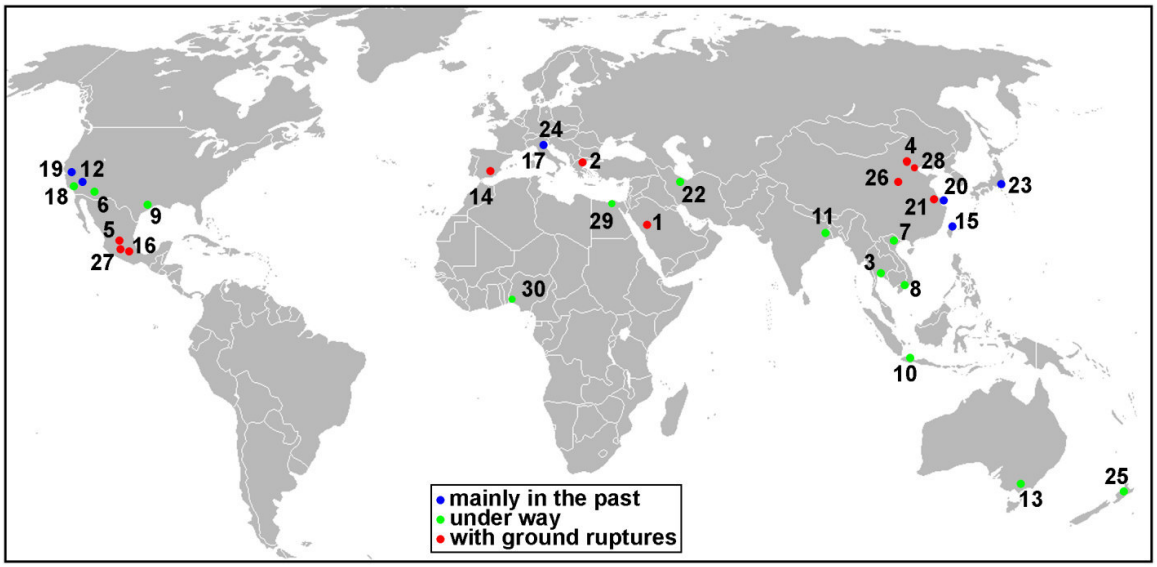


Figure 9 - Major worldwide areas of anthropogenic land subsidence due to groundwater withdrawal. Different symbols are used to distinguish cases of subsidence (i) occurring mainly in the past, (ii) still under way, and (iii) associated with ground rupture. 1: Wadi Al-Yutamah, Saudi Arabia; 2: Anthemountas Basin, Greece; 3: Bangkok, Thailand; 4: Beijing, P.R. China; 5: Celaya, Mexico; 6: Eloy Basin, Arizona, USA; 7: Hanoi, Vietnam; 8: Ho Chi Minh, Vietnam; 9: Houston, Texas, USA; 10: Jakarta, Indonesia; 11: Kolkata, India; 12: Las Vegas, Nevada, USA; 13: Latrobe Valley, Australia; 14: Lorca, Spain; 15: Taipei, Taiwan; 16: Mexico City, Mexico; 17: Ravenna, Italy; 18: San Joaquin Valley, California, USA; 19: Santa Clara Valley, California, USA; 20: Shanghai, P.R. China; 21: Su-Xi-Chang area, P.R. China; 22: Tehran, Iran; 23: Tokyo, Japan; 24: Venice, Italy; 25: Wairakei, New Zealand; 26: Xian, P.R. China; 27: Zamora de Hidalgo, Mexico City; 28: Tianjin, P.R. China; 29: Nile River delta, Egypt; 30: Lagos, Nigeria.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

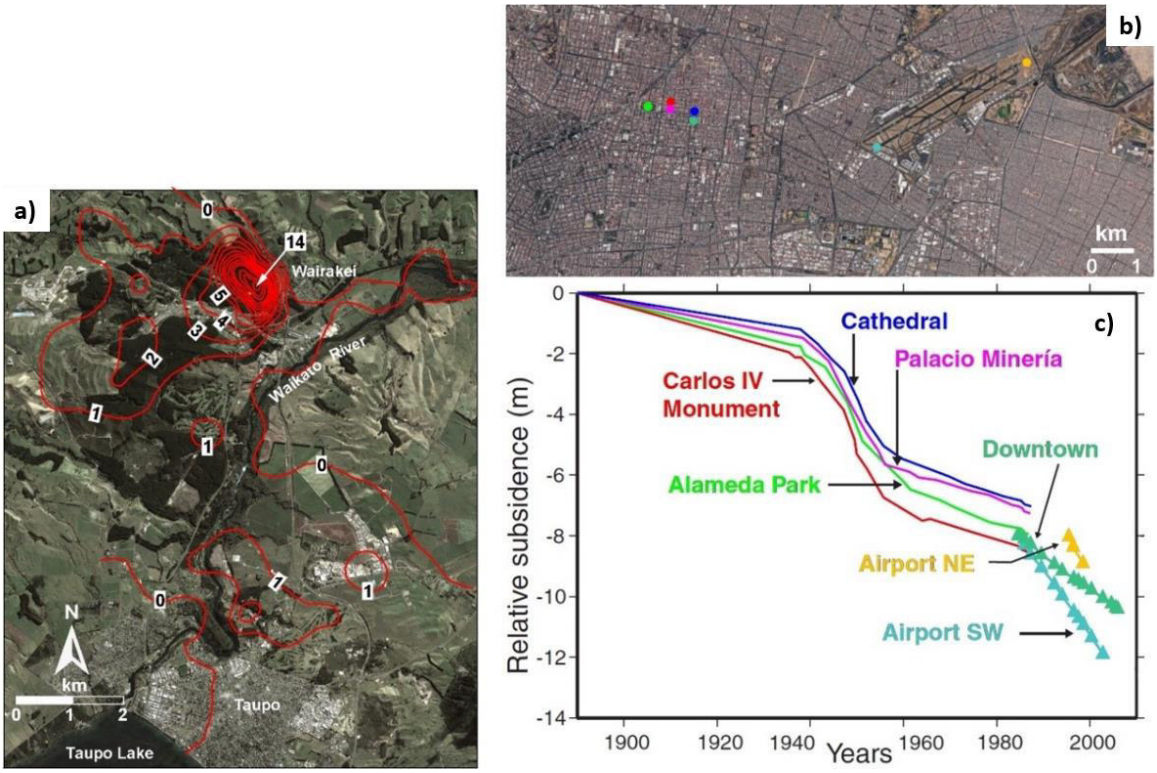


Figure 10 - a) Total subsidence at the Wairakei geothermal field over the 1953–2005 period. Contour line interval: 1 m; maximum subsidence contour line: 14 m (after Allis et al., 2009). b) The locations of the monitoring points. c) Multitechnique composite plot of the subsidence in the Mexico City downtown area since 1895. Pre-1985 leveling data were collected at selected city landmarks, whereas 1985–2002 data were derived from leveling of a modern benchmark network (after Cabral-Cano et al., 2008).

The depth of fluid abstraction wells may range from those tapping very shallow water table aquifers quite close to the ground surface, to those tapping very deep (4000-5000 m) gas/oil reservoirs. The overall extent of the sinking area can be large, totaling as much as 13,500 km^2 in the San Joaquin Valley (Poland and Lofgren, 1984) and 12,000 km^2 in the Houston-Galveston area of Texas (Gabrysch and Neighbor, 2000. China is perhaps the country with the largest cumulative area of subsidence (about 80,000 km^2) subsurface water overdraft has occurred. Figure 9 also shows the major sinking cities in China (Xue et al., 2005). For an initial review of human-induced land subsidence through illustrative case histories worldwide and more recently from across the United States, the reader may consult Poland (1984) and Galloway et al. (1999), respectively.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Table 1 - Selected areas of major land subsidence due to groundwater withdrawal worldwide. The time of occurrence is provided between parentheses. Rates represent the local maximum measured rate for the specified period. Negative values indicate uplift.

#	Location	Maximum subsidence (m)	Maximum rate (cm/yr)	Depth of pumping (m)	Area of subsidence (m^2)	Principal references
1	Wadi Al-Yutamah	0.3 (1993-1996)	-	0-150	150	Banker and Al-Harthia [1999]
2	Anthemountas Basin	-	3.5 (1995-2001)	30-150	40	Raspini et al. [1933]
3	Bangkok	2.1 (1933-2002)	2 (2005-2010)	30-300	700	Phien-wej et al. [2006]; Aobpaet et al. [1999]
4	Beijing	1.1 (1955-2007)	5 (2003-2010)	20-400	4200	Zhang et al. [2014] Zhu et al. [2014]
5	Celaya	3.1 (1985-2008)	9 (2007-2011)	50-200	50	Huizar-´Alvarez et al. [2011]; Chaussard et al. [2014]
6	Eloy Basin	3.0 (1948-1977)	4 (2010-2014)	100-760	1000	Holzer et al. [1979]; Conway [2014]
7	Hanoi	0.5 (1988-2003)	7 (2007-2011)	0 - 80	35	Thu and Fredlund [2000]; Dang et al. [2014]
8	Ho Chi Minh	0.4 (1996-2005)	4 (2006-2010)	50-240	250	Erban et al. [2014]
9	Houston	3 (1915-2000)	2.5 (2005-2012)	60-900	12000	Gabrysch and Neighbors [2000]; Yu et al. [2014]
10	Jakarta	4.1 (1974-2010)	26 (2007-2011)	40-240	660	Ng et al. [2012]
11	Kolkata	1.1 (1956-2000)	4 (2001-2005)	50-160	150	Shau and Sikdar [2011]
12	Las Vegas	2 (1935-2000)	2.5 (1997-1999)	200-300	250	Amelung et al. [1999]; Hoffmann et al. [2001]
13	Latrobe Valley	1.3 (1960-1977)	1.5 (2006-2011)	0-150	400	Gloe [1984]
14	Lorca	2.2 (1992-2012)	16 (1992-2011)	50-300	140	Gonzalez et al. [2012]
15	Taipei	2 (1955-1991)	-0.7 (1989-2003)	50-250	200	Chen et al. [2007]
16	Mexico City	13 (1960 to present)	30 (2007-2011)	0-350	250	Ortiz-Zamora and Ortega-Guerrero [2010]; Chaussard et al. [2014]
17	Ravenna	1.4 (1897-2002)	0.2 (1998-2002)	80-450	400	Teatini et al. [2006]
18	San Joaquin Valley	10 (1930 to present)	30 (2007-2011)	60-600	13500	Galloway and Riley [1999]; Borchers and Carpenter [2014]
19	Santa Clara Valley	4.3 (1910-1995)	-0.5 (1992-2000)	50-280	500	Schmidt and Burgmann [2003]; Borchers and Carpenter [2014]
20	Shanghai	2.6 (1958-2002)	1.5 (2006-2011)	10-330	5000	Wu et al. [2010]; Dong et al. [2014]
21	Su-Xi-Chang area	1.1 (1960-1995)	3 (2003-2008)	20-200	4000	Shi et al. [2007]; Yu et al. [2009]
22	Tehran	3.0 (1989-2004)	15 (2004-2005)	20-100	500	Mahmoudpour et al. [2013]
23	Tokyo	4.3 (1900-1975)	-0.3 (1991-2005)	0-400	3400	Sreng et al. [2011]
24	Venice	0.12 (1952-1973)	0.1 (2008-2011)	70-350	150	Gambolati et al. [1974]; Teatini et al. [2012]
25	Wairakei	14.5 (1950 to present)	9 (2000-2007)	250-800	25	Allis et al. [2009]
26	Xian	2.3 (1959-1995)	11 (2005-2012)	50-370	240	Zhao et al. [2008]; Qu et al. [2014]
27	Zamora de Hidalgo	-	18 (2007-2011)	0-300	15	Chaussard et al. [2014]
28	Tianjin	3.2 (1959-2007)	11 (1975-1985)	0-550	8000	Yi et al. [2011]
29	Nile River delta	-	1 (2004-2010)	20-200	4800	Gebremichael et al. [2018]
30	Lagos	-	0.6 (2011-2018)	50-200	350	Cian et al. [2019]

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

1.4 Major Environmental Impacts

Some major impacts of anthropogenic land subsidence include:

- increased flood risk (frequency, depth and duration of flooding events) and more frequent inundation induced by rainfall because of the reduced effectiveness of the drainage systems;
- damages to buildings, foundations, infrastructures (roads, bridges, dikes) and underground structures (drainage, sewerage, pipes); and,
- disruption of water management and related effects (change of gradient of streams, canals, drains, increased seawater intrusion, increased pump power).

Moreover, as a result of limited available space, housing, industrial buildings and infrastructures are increasingly located in land settlement-prone areas, including flood plains and coastal marshes. These conditions may be aggravated in the long term by future climate changes climate causing sea level rise, stronger storm surges and increased precipitation.

Land subsidence causes direct and indirect damages. Direct damages include the loss of functionality and/or integrity of the structures such as buildings, roads, subways and underground utility networks (infrastructures). Indirect damages also occur such as a decrease of farmland productivity in deltaic areas because freshwater availability has been limited by an increase in saltwater intrusion (resulting from a decreased land elevation). The most common indirect effects are related to changes in relative surface and subsurface water levels. The estimation of the associated cost is quite complex. In practice operational and maintenance costs are addressed in several short- and long-term policies and budgeting. In China the average total economic loss due to anthropogenic land subsidence is estimated around 1.5 billion dollars per year 80-90 percent of which are indirect costs. In Shanghai, over the decade 2001-2010, the total cumulative loss approached two billion dollars. In Bangkok, Thailand, many private and public buildings, roads, pavements, levees and subsurface structures (sewage, drains) have been severely damaged by land subsidence although reliable estimate of costs are not available. The total cost of damage referred to subsidence in The Netherlands was estimated at over 3.5 billion euro per year.

Unexpected environmental problems can also occur after the cessation of land subsidence. When pumping regulation allows water levels to begin to recover water may begin to appear in unexpected areas. For example, in Tokyo a fast recovery of the piezometric head caused infrastructure damages by buoyant forces acting on the building foundations and groundwater seeped into the basement floor of buildings and tunnels (Tokunga, 2008). In the industrial zone on the Venice mainland, Italy, a significant re-pressurization of the deep confined aquifers occurred once the pumping was shut down in the early 1970s. More than 400 deep abandoned boreholes, improperly plugged, acted as preferential conduits that supplied water to recharge the phreatic aquifer requiring large water draining and treatment costs for the factories established in the area (Paris et al., 2010).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Prior to development, evaluation of the prospective impacts that groundwater/hydrocarbon production may have on the local environment and a set of guidelines describing steps needed to assess the potential environmental risk and implement a strategy for a "*sustainable*" development are needed. Three basic major steps can be envisaged in a control program to be set up in advance of the withdrawal inception:

1. Prediction of the expected land settlement in the area using the state-of-the-art models. These should rely on the available information supplied by the project related exploratory boreholes and the previous general knowledge of the subsurface basin of interest.
2. Continuous monitoring and measuring of the subsidence where environmental, economic and social vulnerability is high. Monitoring should start well before the inception of production so as to identify, with reasonable certainty, the actual consequences of the planned development. Land surface monitoring using methods such as spirit leveling, DGPS, Differential Global Positioning System, InSAR, and Interferometric Synthetic Aperture Radar should be conducted. Monitoring at the depth of the depleted formations should also be conducted using tools like extensometers. A network for measuring micro-seismicity should also be installed.
3. Prevention of the expected anthropogenic land subsidence or mitigation of the settlement experienced during aquifer/field development. Sensitive spots (subsidence values larger than defined sustainable) should be identified and mitigation proposed. A pressure maintenance program including options for recharging the formation with properly treated surface water should be considered.

The activities described above are obviously interconnected and data acquired in one step may be used in the others. For a recent thorough review of the major issues associated with anthropogenic land subsidence due to fluid withdrawal the reader is referred to Gambolati et al. (2005) and Gambolati and Teatini (2015). A discussion that integrates the technical, social, economic, legal, and political conflicts arising from land subsidence is provided by Freeze (2000).

2 Theory of 1-D Soil Consolidation and Aquifer Response to Pumping

Stratified systems behave mechanically as if they were one-dimensional (1-D) structures, and, although fluid flow may be 3-D, displacement occurs mostly in the downward vertical direction (Figure 5b). This presentation of the theoretical foundation used to examine anthropogenic land subsidence is a two-step process. The first step addresses the fluid-dynamic component. It controls the porous medium's flow behavior as accounted for by the elastic storage S_s. The second step solves the structural problem by using the spatial gradient of the fluid pore pressure p calculated in the first step as a driving

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

force within the geomechanical medium (which may be over- or under-consolidated and faulted). The spatial gradient of p controls the solid skeleton deformation and subsidence (that is, vertical displacement) at the land surface.

2.1 Effective Intergranular Stress and Soil Parameters

The theories of land subsidence are founded on basic principles of soil mechanics. Thus, the following discussion describes soil parameters, however, references to soil can be viewed as aquifer and confining bed material in a groundwater system.

The soil is viewed as a set of grains in contact. Assume a degree of saturation equal to 1 (that is, full saturation). Make a (macroscopically) horizontal cross section through the soil intersecting the contact points (Figure 11).

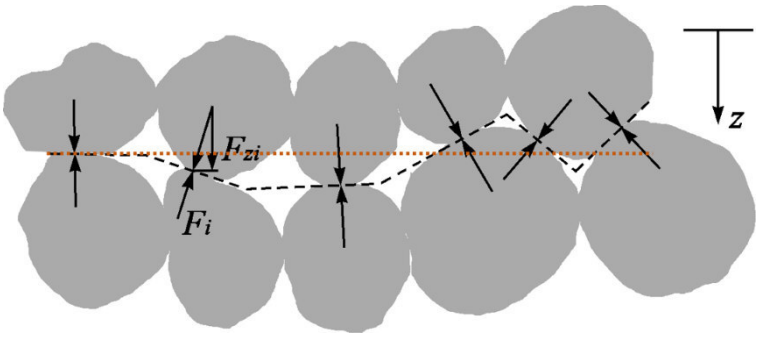


Figure 11 - Schematic vertical cross-section through a porous medium. The black dashed line is the crossing surface and the dotted orange line is the horizontal projection of the crossing surface.

Consider a piece of such a section with area A on a horizontal plane (dotted orange line, Figure 11) and n contact points (black arrows, Figure 11). If F_{zi} is the vertical component of the force that the grains exchange through the i^{th} contact area (Figure 11), we define "*effective intergranular stress*" σ_z by Equation 1.

$$\sigma_z = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_{zi}}{A} \tag{1}$$

Equation 1 shows that effective intergranular stress is the uniform stress over the unit horizontal projection of a crossing surface with n contact points. Stress is a force per unit area and has dimensions of $ML^{-1}T^{-2}$, that is, the same dimensions as pressure. The effective intergranular stress is equivalent to the combined individual stresses, $\sigma_{zi} = F_{zi}/A_i$ spread over the horizontal area, A, with stress taken to be positive in compression such that the force is the same. That is,

$$\sigma_z A = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{zi} A_i$$

namely:

$$\sigma_z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{zi} A_i}{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_{zi}}{A}$$

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Denote the geostatic stress by σ_c, that is, the weight of a soil column applied to a unit horizontal area at a given depth. The weight of a soil column is the combined weight of the solids and the fluids in the pores. In the case of full saturation, σ_c is equilibrated by σ_z and the pore pressure p as shown in Equation 2. The fluid pressure is distributed over the unit area minus the area of grain contacts as expressed in the parentheses of Equation 2.

$$\sigma_c = \sigma_z + p\left(1 - \sum_{i=1}^{n} A_i \cos\alpha_i\right) \tag{2}$$

where:

σ_c = geostatic stress ($ML^{-1}T^{-2}$)

σ_z = effective intergranular stress ($ML^{-1}T^{-2}$)

p = pore pressure ($ML^{-1}T^{-2}$)

α_i = angle between the contact area, A_i, and the vertical

A_i = contact area normal to the force between grains (L^2)

The contact area $\Sigma(A_i \cos\alpha_i)$ is much smaller than 1 (as explained in Box 1), thus the quantity within the parentheses is essentially 1, hence, on first approximation, Equation 2 becomes Equation 3.

$$\sigma_c = \sigma_z + p \tag{3}$$

The geostatic load σ_c is also called "*total vertical stress*". If σ_c remains constant during pumping (this is essentially the case for a pumped confined aquifer because pores do not drain), a decrease of p induces an equal increase of effective intergranular stress, σ_z, under whose effect the pumped formation compacts. Of course, this is a preliminary analysis. A more complete study should take into account second order effects such as the forces of mutual attraction among the grains and the fluid surface tension as well as the gas pressure in partially saturated soils.

To evaluate the compaction of a formation with decreased pore pressures we need to define a few dimensionless characteristic soil parameters:

- the void ratio e, that is, the ratio of the pore volume to the grain volume; and,
- the porosity ϕ, that is, the ratio of the pore volume to the total volume.

The following relationships hold:

e = PoreVolume/(TotalVolume - PoreVolume) = $\phi/(1 - \phi)$

$\phi = e/(1 + e)$

A most important experimental profile is the behavior of e versus σ_z as derived from laboratory tests on soil samples from the compacting formation. Qualitatively, the behavior of e versus σ_z is shown in Figure 12. If the effective intergranular stress increases, the formation compacts and e decreases. As a first approximation, we assume the grains to be incompressible (the grains are much, much stiffer than the porous matrix, and especially

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

so in shallow soils). This implies that the porous medium compaction is due essentially to the reduction of the pore volume, that is, the reduction of e and ϕ.

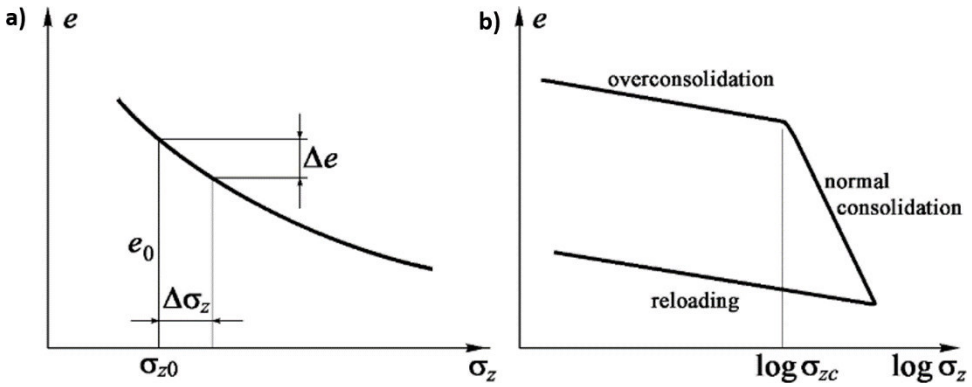
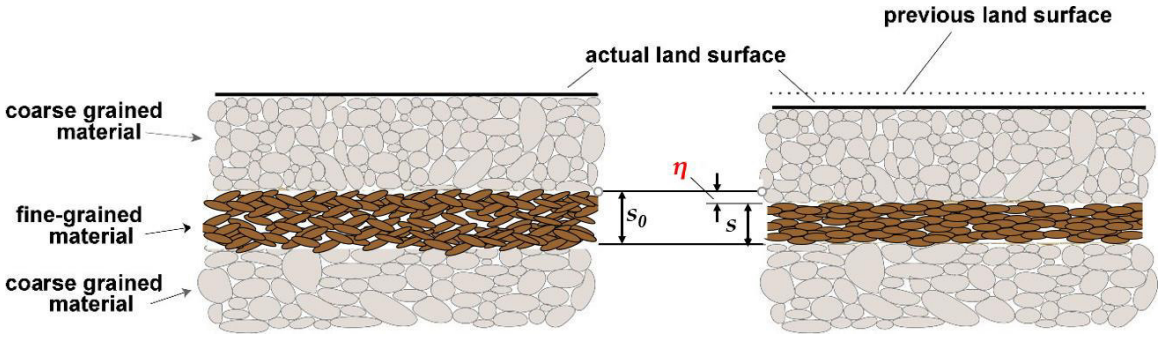


Figure 12 - Typical behavior of the void ratio e against a) the effective intergranular stress σ_z and b) log σ_z. The over-consolidation (if present), normal consolidation, and reloading phases are highlighted on (b). Over-consolidation denotes a soil that has, in the past, experienced a maximum effective stress equal to σ_{zc} that was later reduced (e.g., because of surface erosion).

The total compaction η of a layer (η has dimensions of length) as illustrated in Figure 2 (repeated here for the readers convenience) with initial thickness s_0 and initial void ratio e_0 is completely due to reduced pore space as reflected by Equation 4.



Repeat of Figure 2 for the reader's convenience - Soil compaction η with a reduction of the porous space (grains are incompressible for all practical purposes).

$$\eta = s_0 \frac{\Delta e}{1 + e_0} \tag{4}$$

Equation 4 is readily derived by means of the following geometric consideration: if we assume the solid grains are incompressible, the grain volume "disappeared" because of compaction must be equal to the increased volume of the grains within the compacted layer. Let A represent the horizontal area of the compacting layer. With reference to Figure 2, the grain volume loss due to compaction η is equal to $\eta A(1 - \phi_0)$, i.e.,

$$\eta A/(1 + e_0)$$

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

and the increased grain volume in the compacted layer is equal to $sA\big((1-\phi)-(1-\phi_0)\big)$, that is,

$$(s_0-\eta)A\left(\frac{1}{1+e_0-\Delta e}-\frac{1}{1+e_0}\right).$$

Then, equating the above two equations and rearranging yields Equation 4.

The uniaxial vertical soil compressibility c_b is the fractional change in volume, $d(\Delta V)/\Delta V$, in response to a unit change in stress, $d\sigma_z$, and has dimensions of inverse stress $M^{-1}LT^2$.

$$c_b = \frac{d(\Delta V)}{d\sigma_z}\frac{1}{\Delta V}$$

where:

c_b = uniaxial vertical soil compressibility ($M^{-1}LT^2$)

ΔV = volume before compaction (L^3)

Since $d(\Delta V)/\Delta V$ = (Pore Volume change)/(Pore Volume + Grain Volume) = $\Delta e/(1+e)$, we can substitute $\Delta e/(1+e)$ for $d(\Delta V)/\Delta V$ to obtain the following expression for c_b.

$$c_b = \frac{1}{d\sigma_z}\frac{\Delta e}{(1+e)}$$

The uniaxial vertical soil compressibility can be expressed as shown in Equation 5 by including a minus sign so as to obtain a positive c_b value (σ_c and σ_z are assumed to be positive even though they are compressive stresses). Then, compressibility, c_b, can be estimated in the laboratory by finding the slope of the experimental profile shown in Figure 12a and evaluating Equation 5.

$$c_b = -\frac{de}{d\sigma_z}\frac{1}{1+e} \tag{5}$$

The minus sign in the above equation is introduced so as to obtain a positive c_b value (σ_c and σ_z) are assumed to be positive although they are compressive stresses). Assume c_b is constant, then Equation 5 leads to:

$$\frac{de}{1+e} = -c_b d\sigma_z$$

and integration leads to:

$$ln(1+e) = -c_b\sigma_z + C$$

which simplifies to Equation 6.

$$e = C\,\exp^{(-c_b\sigma_z)} - 1 \tag{6}$$

The integration constant C is determined by prescribing that $e = e_0$ for $\sigma_z = \sigma_{z0}$, thus C is:

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$C = (1 + e_0)\exp^{-(-c_b\sigma_{z0})}$$

and substituting C into Equation 6 results in Equation 7.

$$e = (1 + e_0)\exp^{[-c_b(\sigma_z - \sigma_{z0})]} - 1 \quad (7)$$

Generally, e_0 corresponds to the initial conditions where $\sigma_z = \sigma_{z0}$ prior to the inception of pumping. The assumption of constant c_b has validity over a limited range of σ_z. The porous medium becomes stiffer as $\Delta\sigma_z$ increases and compaction progresses. Therefore, Equation 7 will be used for σ_z values falling within a given stress range. In general, c_b will be calculated using Equation 5 once the profile of Figure 12 is available.

2.2 Pumping from a Water Table Aquifer

For the sake of simplicity, assume a water table aquifer is horizontal and the piezometric decline due to pumping over a given time interval is Δz. Let θ_w be the moisture content (i.e., the fraction of the total porous medium volume occupied by water, moisture content is equal to porosity in a fully saturated medium) within the unsaturated zone above A, and, between the phreatic surfaces (labeled as the piezometric levels A and B in Figure 13) after the piezometric surface has declined from A to B.

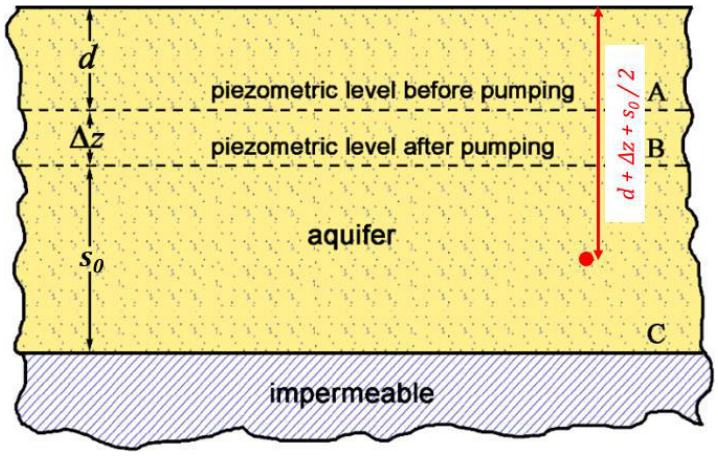


Figure 13 - Sketch of a pumped water table aquifer.

As a result of lowering the piezometric level, there will be an increase of effective stress due to drainage of water from the zone between A and B because that zone is no longer under the influence of pore water pressure (Archimedes' upward buoyant force). At any point location between B and C, the geostatic stress, σ_c, is decreased by the quantity $\gamma\Delta z(\phi - \theta_w)$, with γ being the specific weight of water with dimensions $ML^{-2}T^{-2}$, and the quantity $\gamma\Delta z$ being p. Therefore, the effective stress, σ_z, is increased by (Equation 8),

$$\Delta\sigma_z = \gamma\Delta z(1 - \phi + \theta_w) \quad (8)$$

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

that is to say, it is increased by the difference in Archimedes' force exerted upon the solid grains before and after pumping. The layers underlying the water table aquifer, where p remains constant, experience a σ_z reduction equal to the σ_c reduction (that is, $\gamma\Delta z(\phi - \theta_w)$) with a resulting small rebound. As the magnitude of the rebound is small, it is discarded in the following calculation. Let's refer to the mid-point between B and C in Figure 13. The stress σ_{z0} before withdrawal is as shown in Equation 9.

$$\sigma_{z0} = (1-\phi)[\gamma'(d + \Delta z + s_0/2) - \gamma(\Delta z + s_0/2)] + \gamma\theta_w d \tag{9}$$

where:

γ' = specific weight of the solid grains [$ML^{-2}T^{-2}$]

To obtain Equation 9 we used Equation 3 where σ_c is equal to the geostatic weight of a soil column with height $h = d + \Delta z + s_0/2$, that is, $\sigma_c = \gamma\theta_w d + \gamma' h(1 - \phi) + \gamma\phi(h - d)$, and $p = \gamma(h - d)$. We thus locate the σ_{z0} point in Figure 12a and, by making use of Equation 8, compute the subsidence at a given depth according to Equation 4 as follows.

$$\eta = \frac{\Delta e}{1 + e_0}\left(s_0 + \frac{\Delta z}{2}\right)$$

It is easier to visualize the relationship between compaction and void ratio using an abstract version of Figure 2 in which all solids are grouped with no pore space and all pore space occupies the remainder of the volume, with example values assigned and calculations carried out, as explained in Box 2↴. Box 2 also provides a worked example of calculating the change in effective stress for a decline in the piezometric level of an unconfined aquifer as shown in Figure 13.

If s_0 is large, we can divide s_0 into a number of sublayers and implement the above calculation for the mid-point of each sublayer ($\Delta\sigma_z$ is the same for each sublayer while σ_{z0} changes).

In summary, the compaction of a phreatic aquifer is shown in Equation 10.

$$\eta = \left(s_0 + \frac{\Delta z}{2}\right) c_b \Delta\sigma_z \tag{10}$$

In Equation 10, c_b is the uniaxial vertical soil compressibility, and $\Delta\sigma_z$ is the change in the effective intergranular stress (Equation 8).

2.3 Pumping from a Single Confined Aquifer

Let Δz be the piezometric decline in the confined aquifer (Figure 14). Since the weight of the overlying soil column does not change, that is, σ_c is constant, there is an equal, albeit of opposite sign, change in the effective intergranular stress and the pore pressure, that is, $\Delta\sigma_z = p = \gamma\Delta z$. Computing σ_c at the mid-point of the aquifer as the sum of the stress σ'_c at the bottom of the overlying aquitard plus the weight of aquifer column down to the mid-point results in:

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$\sigma_c = \sigma_c^{'} + 0.5 s_0[(1-\phi)\gamma' + \phi\gamma]$$

thus, the intergranular stress is shown by Equation 11.

$$\sigma_{z0} = \sigma_c^{'} + 0.5 s_0[(1-\phi)\gamma' + \gamma\phi] - p \tag{11}$$

where:

σ_c' = geostatic stress at the bottom of the overlying impermeable layer

p = pore pressure measured on the mid-plane of the aquifer prior to the piezometric decline [$ML^{-1}T^{-2}$]

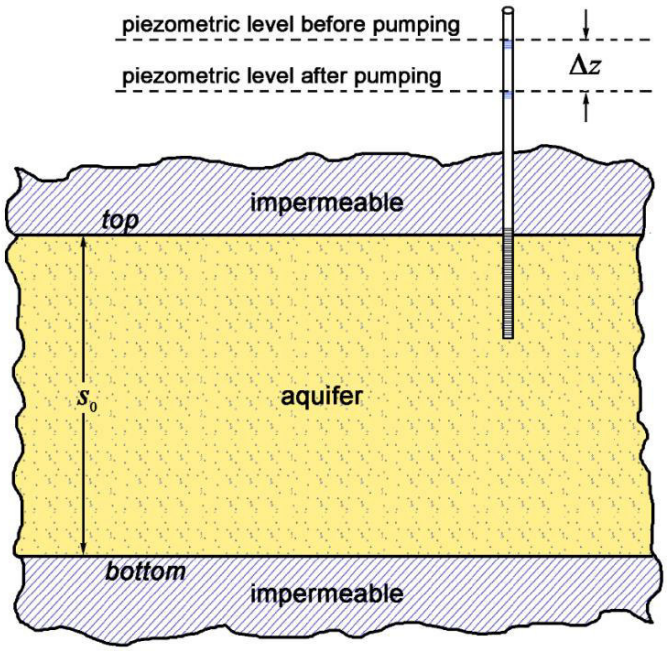


Figure 14 - Sketch of a pumped confined aquifer.

Land subsidence is equal to the aquifer compaction as calculated by the use of a graph as shown in Figure 12 and Equation 3. Again, if s_0 is large, it can be split into sub-intervals and σ_{z0} computed for each sub-interval (while $\Delta\sigma_z$ is the same for each sub-interval).

In summary, the compaction of a single confined aquifer amounts to (Equation 12):

$$\eta = s_0 c_b \Delta\sigma_z \tag{12}$$

with s_0 the aquifer thickness, c_b is the uniaxial vertical soil compressibility, and $\Delta\sigma_z$ is the change in the effective intergranular stress.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

2.4 Pumping from a Multi-aquifer System

Let's consider an example of a complex multi aquifer system composed by an unconfined and two confined aquifers (Figure 15). Denote by Δz_1, Δz_2, and Δz_3, the piezometric decline in the three pervious formations, respectively. Land settlement η_1 caused by the depressurization of the unconfined aquifer is computed as is described in Section 2.2. As far as the two confined aquifers are concerned, we have to take into account the decrease of the total geostatic stress equal to $\Delta z_1 \gamma(\phi_f - \theta_w)$, with ϕ_f the porosity of the water table aquifer. As a result, σ_z increases for formations 2 and 3 (Figure 15), respectively:

$$\Delta\sigma_2 = \Delta z_2 \gamma - \Delta z_1 \gamma(\phi_f - \theta_w)$$
$$\Delta\sigma_3 = \Delta z_3 \gamma - \Delta z_1 \gamma(\phi_f - \theta_w)$$

The compactions η_2 and η_3 of the confined aquifers are obtained from Equation 4 and Figure 12 where the representative effective stress prior to pumping is calculated by the use of formulae similar to Equation 11. The subsidence η at the ground surface is then represented by Equation 13.

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \tag{13}$$

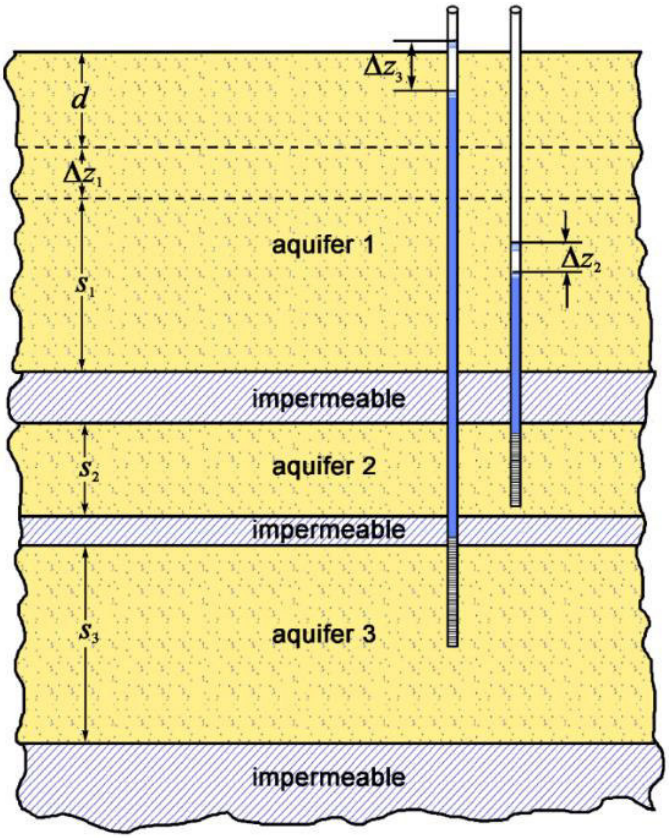


Figure 15 - Sketch of a pumped multi-aquifer system.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

2.5 Delayed Compaction of Aquitards (Confining Beds)

An aquitard (or confining bed) is a clayey-silty low permeability formation that does not provide an appreciable quantity of groundwater to pumping wells; however, it can transmit appreciable water to adjacent aquifers. While flow in an aquifer is predominantly two-dimensional (2-D) and horizontal, particularly if wellbores are fully penetrating, flow in the aquitards separating the aquifers is mostly 1-D and vertical. In a complex aquifer system (for example, Figure 16) the role played by the intervening aquitards is important as they can represent a significant source of water to the aquifers and can contribute greatly to land subsidence as clay/silt compressibility c_b is usually much larger than that of the sand/gravel.

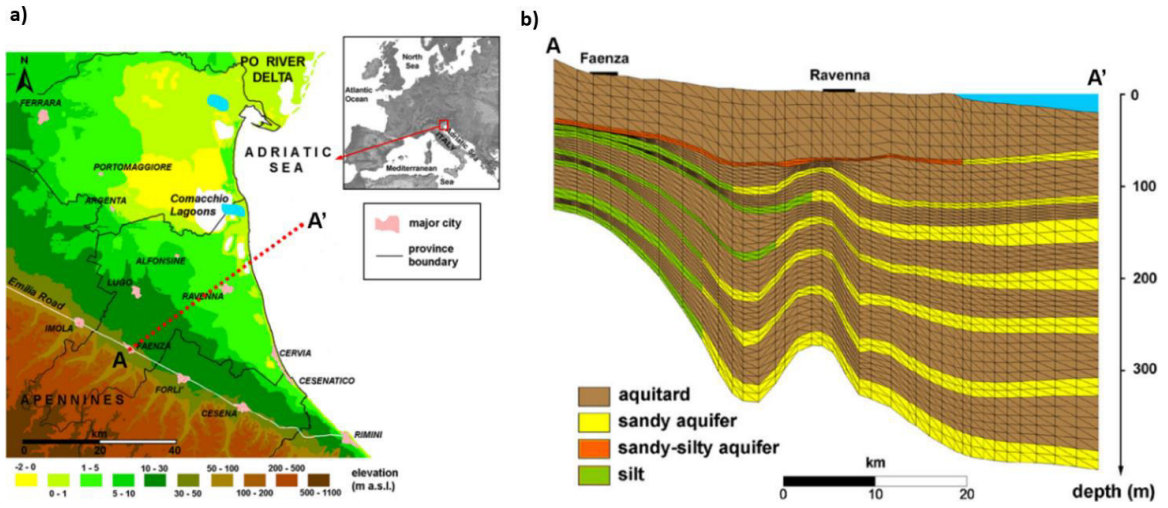


Figure 16 - a) Digital elevation model of the Emilia-Romagna plain, Italy, and b) vertical cross section along the A-A' alignment shown in (a) of the complex multi-aquifer system used to supply freshwater to the coastland (modified after Teatini et al., 2006).

Normally aquitard compaction is larger and delayed in time relative to aquifer compaction. The law that governs pore-water decline in the aquitard as a function of time and the factors controlling compaction are explained in this section. Darcy's law describing the velocity of groundwater flow in an aquitard can be written as shown in Equation 14.

$$v_z = -K\frac{\partial h}{\partial z} \tag{14}$$

where:

v_z = apparent seepage velocity [LT^{-1}]

K = hydraulic conductivity [LT^{-1}]

h = hydraulic head = $z + p/\gamma$ [L]

z = vertical coordinate positive downward [L]

$\partial h/\partial z$ = vertical hydraulic gradient [LL^{-1}]

The hydraulic conductivity is a function of the physical properties of fluid and soil as shown in Equation 15.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$K = k^* \frac{\gamma}{\mu} \tag{15}$$

where:

k^* = intrinsic permeability [L^2]

γ = specific weight of water [$ML^{-2}T^{-2}$]

μ = dynamic viscosity of water [$ML^{-1}T^{-1}$]

Intrinsic permeability is dependent exclusively on the properties of the medium:

$$k^* = CD^2$$

where:

D = a representative length of the porous medium (for example, the average grain size)

C = appropriate parameter related to the soil type

Other more complex relationships (depending on porosity, mean pore diameter, and specific surface area) have been developed for intrinsic permeability of reactive clays, especially if salt is dissolved into the pore water (for example, Raffensperger and Ferrell Jr., 1991).

Assume the initial conditions are in equilibrium, and all the hydrologic and geomechanical quantities presented here are incremental with respect to the initial conditions. Let's balance the weight of water in an elementary soil sample of initial length Δz and unitary cross-sectional area (shown as 1 in the expressions below) between time t and $t + \Delta t$:

- Inflow: (γv_z) (1) (Δt)
- Outflow: $\gamma(v_z + \partial v_z/\partial z\, \Delta z)$ (1) (Δt)
- Weight of water expelled by the porous space contraction and the expansion of the water expressed by Equation 16 (we assume incompressible solid grains the total medium volume change coincides with the porous volume change):

$$-[(\gamma \Delta(\phi \Delta z)\ 1\ \Delta p) + (\gamma \phi \beta\ 1\ \Delta p)] \tag{16}$$

where:

β = volumetric compressibility of water ($ML^{-1}T^{-2}$)

In Equation 16 the total geostatic stress σ_c is assumed to be constant, so (from Equation 3):

$$\Delta \sigma_z = -\Delta p$$

The change in pressure, Δp, is negative when p is reduced, as happens during groundwater pumping. Notice that $\Delta(\phi \Delta z)$ is equal to $\Delta\{[e/(1 + e)]\Delta z\}$ with $\Delta z/(1 + e)$ constant because this is the solid part (grains) of the elementary volume (1) Δz . Hence (from Equation 5) we have:

$$\frac{\Delta e}{1 + e} = c_b \Delta p$$

and therefore, we obtain:

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

- Outflow – Inflow = Weight of water expelled, i.e.

$$\gamma \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \Delta t = -\gamma (c_b + \phi\beta) \Delta z \Delta p$$

Cancelling γ and Δz on both sides and remembering that the hydraulic head $h = z + p/\gamma$, we know that $\Delta p = \gamma \Delta h$, and using Equation 14 when the increment of time approaches zero $\Delta t \rightarrow 0$ we obtain Equation 17:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial h}{\partial z}\right) = \gamma (c_b + \phi\beta) \frac{\partial h}{\partial t} \tag{17}$$

Solving Equation 17, complemented with the appropriate top and bottom boundary conditions and initial conditions, provides the pressure dissipation within the aquitard, and hence the Δp needed to compute the aquitard compaction versus time. The specific storage coefficient is defined in Equation 18.

$$S_s = \gamma (c_b + \phi\beta) \tag{18}$$

S_s represents the "*specific elastic storage*" [L^{-1}] and along with the hydraulic conductivity, K, defines Terzaghi's consolidation coefficient c_v that controls both magnitude and timing of aquitard compaction as shown in Equation 19 given that $\phi\beta << cb$ for typical aquifer confining beds.

$$c_v = \frac{K}{\gamma (c_b + \phi\beta)} \approx \frac{K}{\gamma c_b} \tag{19}$$

The initial conditions correspond to $\Delta p = 0$ for the entire thickness, b, of the aquitard while the boundary conditions are given by Δp in the overlying and underlying aquifers. If the pressure drop Δp_0 is the same at top ($z = 0$) and bottom ($z = b$), then pressure conditions are symmetrical above and below the middle of the aquitard, hence $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$ at $z = b/2$. In this case, the solution to Equation 17 can be expressed in terms of a series expansion. Writing the solution in terms of p produces Equation 20.

$$p = p_0 - \frac{4}{\pi} \Delta p_0 \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\sin(\pi z/b)}{\exp^{(\pi/b)^2 c_v t}} - \frac{1}{3} \frac{\sin(3\pi z/b)}{\exp^{(3\pi/b)^2 c_v t}} - \ldots\right] \tag{20}$$

where:

z = vertical coordinate positive downward starting from the aquitard top ($0 \leq z \leq b/2$)

t = time since the initial change in pressure at the aquitard boundary

For $t = 0$, and setting $\pi z/b = x$ ($0 \leq x \leq \pi/2$) Equation 20 becomes Equation 21.

$$p(z,0) = p_0(z) - \frac{4}{\pi} \Delta p_0 \left[\frac{\pi}{4} - \left(\sin x + \frac{1}{3}\sin 3x + \frac{1}{5}\sin 5x + \ldots\right)\right] \tag{21}$$

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

The content within the parentheses of Equation 21 is the Fourier series development of the function $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} \pi/4 & \text{for } 0 \le x < \pi \\ -\pi/4 & \text{for } \pi < x \le 2\pi \end{cases}$$

Keeping in mind the range of variability of x ($0 \le x \le \pi/2$) we conclude that Equation 20 accurately represents the initial pore pressure at time $t = 0$.

2.6 Time Factor and Compaction Profile

The (positive) compaction $\eta(t)$ of the half aquitard at time t is:

$$\eta(t) = \int_0^{b/2} c_b(p_0 - p)\ dz$$

Substituting Equation 20, and integrating term by term leads to Equation 22.

$$\eta(t) = \frac{4}{\pi^2} c_b \Delta p_0 b \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\exp^{[(2n+1)\pi/b]^2 c_v t}} \right\} \tag{22}$$

For $t = 0$ we get $\eta(0) = 0$, while for $t = \infty$ Equation 22 becomes Equation 23.

$$\eta(\infty) = \frac{4}{\pi^2} c_b \Delta p_0 b \left(1 + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \ldots \right) \tag{23}$$

The above series converges to $\pi^2/8$ and therefore $\eta(\infty)$ is the ultimate compaction of the half aquitard, as was already pointed out for the various aquifers represented by Equations 4 and 5 and is expressed here as Equation 24.

$$\eta(\infty) = c_b \Delta p_0 \frac{b}{2} \tag{24}$$

It may be interesting to compute the time needed by the aquitard to achieve a given percentage of full compaction, $\eta(\infty)$, provided by Equation 24. To this aim we introduce the dimensionless time factor T_v (Equation 25) as defined by Terzaghi (1923).

$$T_v = 4 \frac{c_v t}{b^2} \tag{25}$$

Denoting the percentage compaction as w, Equation 26 shows that it is a function of only T_v.

$$w(T_v) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\exp^{[\pi^2 (2n+1)^2 T_v/4]}} \right\} \tag{26}$$

The behavior of $w(T_v)$ is shown in Figure 17. There are basically two ways to use Figure 17:

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

- enter Figure 17 with a given percent of the final compaction, to obtain the corresponding T_v and calculate the time t needed to reach that percentage from Equation 25; or,
- select a time t, compute T_v from Equation 25 and derive the percentage compaction from Figure 17.

The compaction of the aquitard at time t is shown as Equation 27.

$$\eta(t) = 2w(T_v)\ \eta(\infty) = w(T_v)\ c_b \Delta p_0 b \tag{27}$$

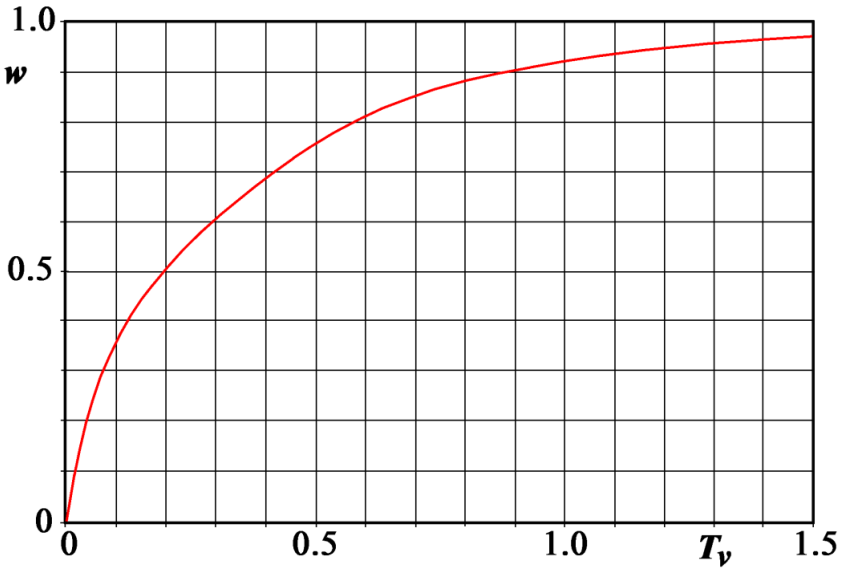


Figure 17 - Behavior of the aquitard compaction $\eta(t)$ relative to the ultimate compaction $\eta(\infty)$, $c_b \Delta p_0 b$ versus time factor T_v.

Figure 17 is also helpful to compute the compaction of an aquitard that is in contact with a non-productive aquifer, for example, with $\Delta p_0 = 0$ at the aquitard bottom. In fact, notice that because of the linearity of Equation 17 and, with Δp_0 equal on both aquitard top and aquitard bottom, we can superpose the effects, namely we can separately compute the compaction of the aquitard subject to $\Delta p_0 \neq 0$ on top and $\Delta p_0 = 0$ on bottom and vice versa $\Delta p_0 = 0$ on top and $\Delta p_0 \neq 0$ on bottom. The Δp behavior versus z for various time values is shown in Figure 18 from right and left respectively.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

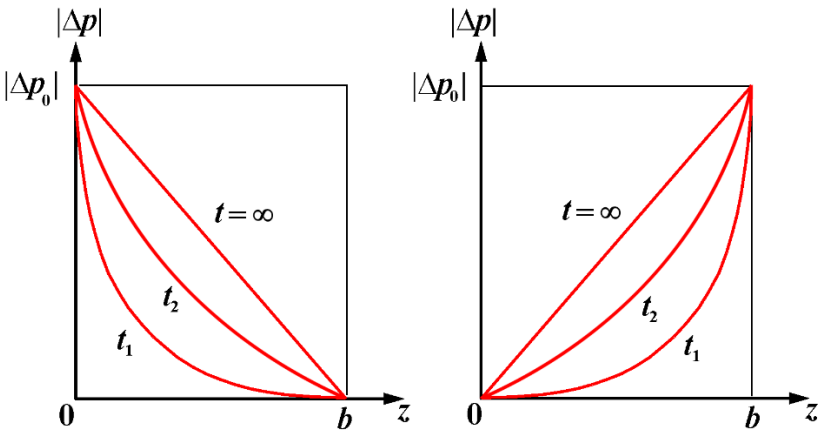


Figure 18 - Schematic behavior of the pore pressure decline in an aquitard subject to an instantaneous pore pressure drop Δp_0 on top ($z = 0$, left) and bottom ($z = b$, right) for representative time values.

The area underlying a Δp_0 profile at any given time, for instance t_1, is the same on the left and right images of Figure 18. Such an area, however, is proportional to the compaction of the aquitard subject to $\Delta p_0 \neq 0$ on both top and bottom, that is, half the value $\eta(t)$ provided by Equation 22. In summary, if one of the adjacent aquifers is not pumped the aquitard compaction is given by Equations 22 and 24 at current time t and $t = \infty$ respectively. We can use the graph of Figure 17 as explained earlier with the percent compaction relative to the final compaction described by Equation 24.

A straightforward generalization is the implementation of the previous outcome to the case where aquifers top and bottom experience different pore pressure drops, that is, $\Delta p_1 \neq \Delta p_2$. The ultimate aquitard compaction is given by Equation 28.

$$\eta(\infty) = \frac{1}{2}(\Delta p_1 + \Delta p_2)\ c_b\ b \tag{28}$$

Figure 17 may be used as described above along with the percentage relative to $\eta(\infty)$ of Equation 26. In case for which the pore pressure drops Δp_1 and Δp_2 on top and bottom of the aquitard are a continuous function of time, they can be approximated with stepwise functions with the effects of the incremental drops superposed at the corresponding times.

3 Measuring and Monitoring Subsidence and Compaction

The analysis and prediction of expected anthropogenic land subsidence due to fluid pumping require a careful reconnaissance study of the area of interest, with a detailed layout of the basin's geology and geometry and reconstruction of the pumping rate evolution, pressure head, and displacements of the land surface. Geomechanical and hydraulic properties are of the utmost importance. Pre-consolidation stress; zones of overpressure; and the presence of faults and thrusts along with their extent, orientation and geomechanical properties (that is, friction angle and cohesion) must all be reliably

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

identified. Advanced technology such as 2-D and 3-D seismic surveys, airborne-electromagnetic investigations, well-logs, exploration boreholes, pumping tests, and specific laboratory analyses can be of great value. Much progress has been made, since the traditional spirit leveling, in accurately monitoring ground surface movements. New techniques include Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) by which land subsidence is measured from space with high accuracy. Advances have also been accomplished in measuring shallow and deep aquifer system compaction by single-level cable and multi-level magnetic borehole extensometers.

Anthropogenic land subsidence modeling and forecasting tools are continuously improved. They take advantage of both enhanced computer devices (for example, parallel hardware) and advanced measurements technology applied to horizontal and vertical ground movements (for example, Differential Global Positioning System (DGPS) and InSAR technologies). Modeling tools are helpful in determining and distinguishing among multiple causes, and can be effectively combined with measurement techniques. Once the models have been calibrated to the observed history of the aquifer, they can be used in their predictive capacity to evaluate various future scenarios of groundwater use. They can be used to develop integrated resource management programs that should take environmental and socio-economic impacts into account. The models are used to evaluate the adverse consequences of fluid extraction in a medium/long time range, in particular for urban flood management of coastal areas and in other cases of environmental vulnerability. The following sections present methods used to measure land subsidence.

3.1 Spirit Leveling

Spirit (differential) leveling is the traditional method of determining ground elevation changes and, despite its simplicity, can be very accurate. Equipment and procedures are described in detail in several manuals, for example, in Rappleye (1948) and Floyd (1978). The technique was developed in the nineteenth century and continues to be applied. The method allows surveyors to carry an elevation from a known reference point to other geodetic marks using a precisely leveled telescope and a pair of graduated vertical rods. For each survey, the elevation difference, e_d, between two benchmarks is recorded twice by accumulating the elevation differences between a series of temporary turning points. The method assumes the stability of the reference benchmark, thus special care must be taken in tectonically active zones. The discrepancy between e_d measured in the forward and backward directions (relative to the direction of the traverse) must not exceed $1.5\sqrt{D}$ mm for a "very high (first order)" precision survey, and $3\sqrt{D}$ mm for a "high (second order)" precision survey, D being the length of the benchmark line in kilometers. Typically, benchmarks are spaced 1 km apart and turning points are 20 to 100 m apart. Once a network of benchmarks has been established and surveyed by precise leveling, a further survey at some later date shows whether vertical movements have occurred (Figure 19).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

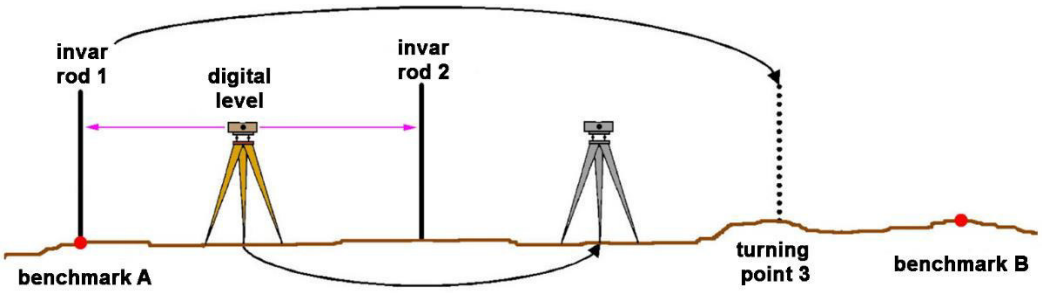


Figure 19 - Sketch of a leveling survey.

Digital levels and invar rods (invar is an alloy of iron and nickel with a negligible coefficient of expansion) help fulfill the selected accuracy, eliminating the human errors and increasing the measurement speed. To ensure long-term time series, the benchmarks, a brass cup or headed bolt, are grouted into massive structures, such as bridge abutments, bedrock outcrops, or attached at the top of a 5 to 10 m long bar driven into the ground and protected by an outer sleeve. Examples of leveling networks established to control land subsidence due to fluid withdrawal are published by Ikehara and others (1997) and Tosi and others (2007).

3.2 Global Navigation Satellite Systems

Developed in the early 1970s and fully operational for civil uses since the mid-1990s, Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have been widely used to monitor land movements occurring over large areas caused by earthquakes, tectonic plate motion, and plate boundary deformation. These systems include the United States Global Positioning System, GPS; the Russian Global Navigation Satellite System, GLONASS; and the European Galileo global navigation satellite system. These systems, generally, although wrongly termed "GPS", consist of earth-orbiting satellites producing radio signals that can be used to obtain accurate land surface positions. GPS has been operational since 1995 with a constellation of 24 satellites at an average orbit altitude of about 20,000 km, arranged in six orbital planes inclined 55° relative to Earth's equator. As of October 2017, there were a total of 31 operational satellites in the GPS constellation.

The signals from at least four satellites can be used by an autonomous receiver anywhere on or near the Earth to determine its approximate absolute (that is, non-differential) position. High precision measurements of crustal movements can be made with differential GNSS by finding the relative displacement between GNSS receivers. Multiple stations situated around an actively deforming area (such as a volcano or fault zone) are used to determine strain and ground movement. Over the last decade, a large number of GNSS tracking stations have been established worldwide. These large over-national and over-continental networks are managed by different institutions and consortiums (for example, SOPAC (sopac.ucsd.edu/index.shtml↗), UNAVCO (www.unavco.org↗), and EUREF (www.epncb.oma.be↗)).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

GNSS observations collected simultaneously at two receivers (one receiver may be a continuous global positioning system) are used to compute a precise baseline between the receivers. Given the known location of the Continuous GNSS (or base station), the 3-D position of the roving receiver is determined by adding the observed baseline vector to the known position. Therefore, geodetic networks of reference marks have been established in subsiding zones. They are surveyed and resurveyed by portable GNSS receivers that are temporary placed on the marks, and used as a reference for one or more continuous GNSS stations (C-GNSS station) located in the area. An example is provided for the Venice region of Italy in Figure 20. One of the first such networks was designed specifically to monitor land subsidence caused by groundwater extraction was established in the Antelope Valley, Mojave Desert, California, USA in 1992 (Ikehara and Phillips, 1994).

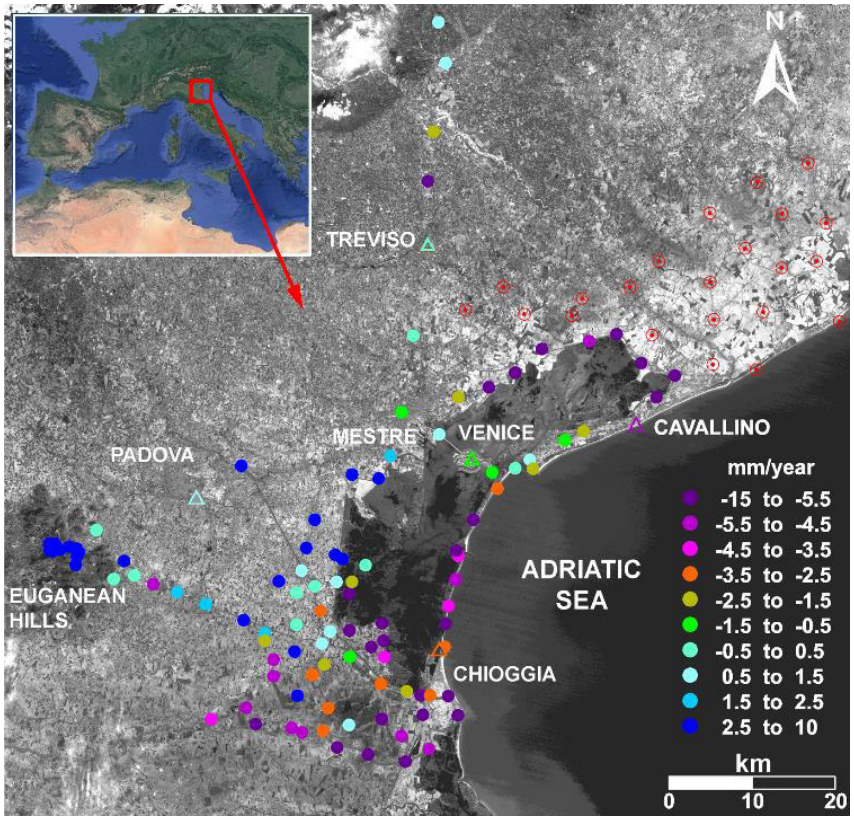


Figure 20 - LANDSAT image of the Venice region (Italy) with the GNSS (circles) and C-GNSS (triangles) networks. Colors are representative of the displacement rates (mm/year) measured between 1999 and 2003. New GNSS benchmarks added to the network in 2004 are indicated with open red circles (after Teatini et al., 2005).

3.3 InSAR

Many scientific papers have been published over the last two decades on the topic of interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR)-based methodologies for measuring displacements in the earth surface, in particular, land movements due to groundwater pumping (for example, Amelung et al., 1999; Hoffmann et al., 2001; Buckley et al., 2003; Hoffmann et al., 2003; Galloway and Hoffmann, 2007; Bell et al., 2008; Higgins et al., 2014; Tosi et al., 2016; Da Lio et al., 2018). The most well-known and widely used SAR

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

processing-chains among a continuously increasing variety of algorithms include: Differential SAR Interferometry - DInSAR (Gabriel et al., 1989), Permanent Scatterer InSAR - PSInSAR (Ferretti et al., 2001), Small Baseline Subset - SBAS (Berardino et al., 2002), Interferometric Point Target Analysis - IPTA (Wegmuller et al., 2004), and ''Squeezed'' SAR - SqueeSAR (Ferretti et al., 2011).

SAR-based techniques exploit the phase difference of the radar signals between or among a number (at least two) of satellite acquisitions over the same area. The phase difference is strictly related to the earth surface displacement occurring between the acquisitions once the surface topography contribution is removed and the atmospheric disturbance mitigated. SAR-based methodologies allow for the detection and measurement of sub-centimeter-scale ground movement with high spatial detail and high measurement resolution. Several SAR-borne satellites have been in operation from 1991 to the present (ERS-1/2; ENVISAT; JERS-1; Radarsat-1/2, ALOS, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed) and SENTINEL-1 has been in operation since mid-2014, thus a large satellite SAR data archive exists over many areas. Figure 21 shows two significant examples of SAR-derived land subsidence.

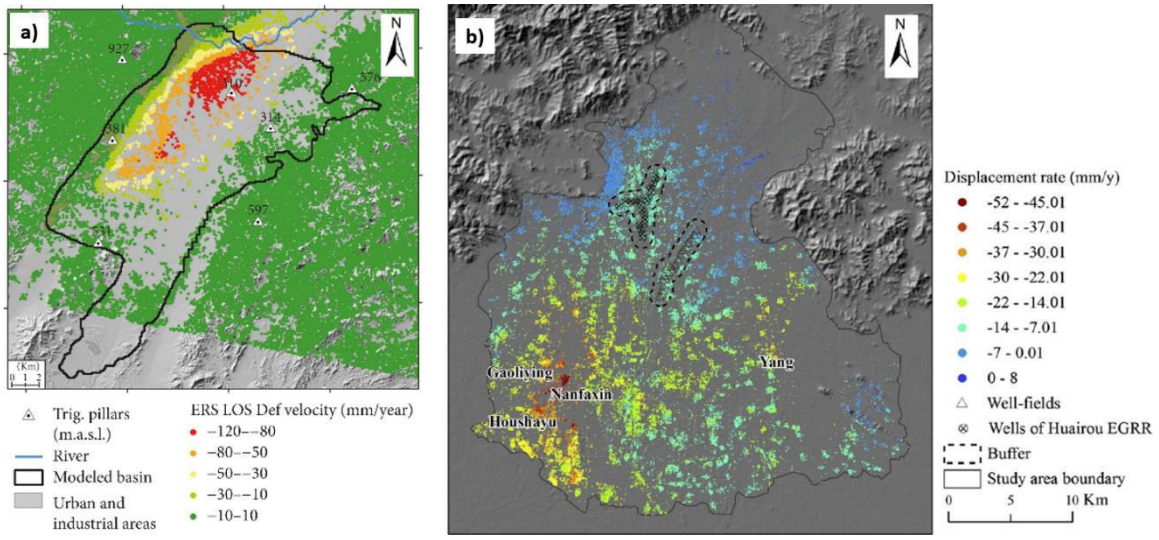


Figure 21 - a) Alto Guadalentín Aquifer (SE Spain): LOS deformation velocities from ERS data (C-band, 1992–2000) (modified after Ezquerro et al., 2017). b) Northern Beijing plain, China: average displacement rate detected by IPTA from June 2003 to January 2010. Negative values mean land subsidence, positive values mean uplift (modified after Zhu et al., 2015).

As in the case of leveling, SAR-based data are differential measurements, that is, displacements relative to a reference point. Therefore, the movement of the reference point has to be known, for example, from previous leveling or permanent GPS stations, in order to calibrate the SAR results and obtain "absolute" displacements. SAR-based measurements are 1-D measurements related to the projection along the satellite Line-Of-Sight (LOS) of the 3-D displacement vector affecting the radar target. Given that the radar viewing angle is less than 45° from the vertical, the SAR outcome is most sensitive to vertical motion. However, the combination of the Earth's rotation and satellite motion makes it possible for

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

any area of interest to be illuminated by the satellite radar sensor along two different acquisition geometries: one having the satellite flying from south to north, known as "ascending mode" and the other from north to south called "descending mode" as portrayed in Figure 22.

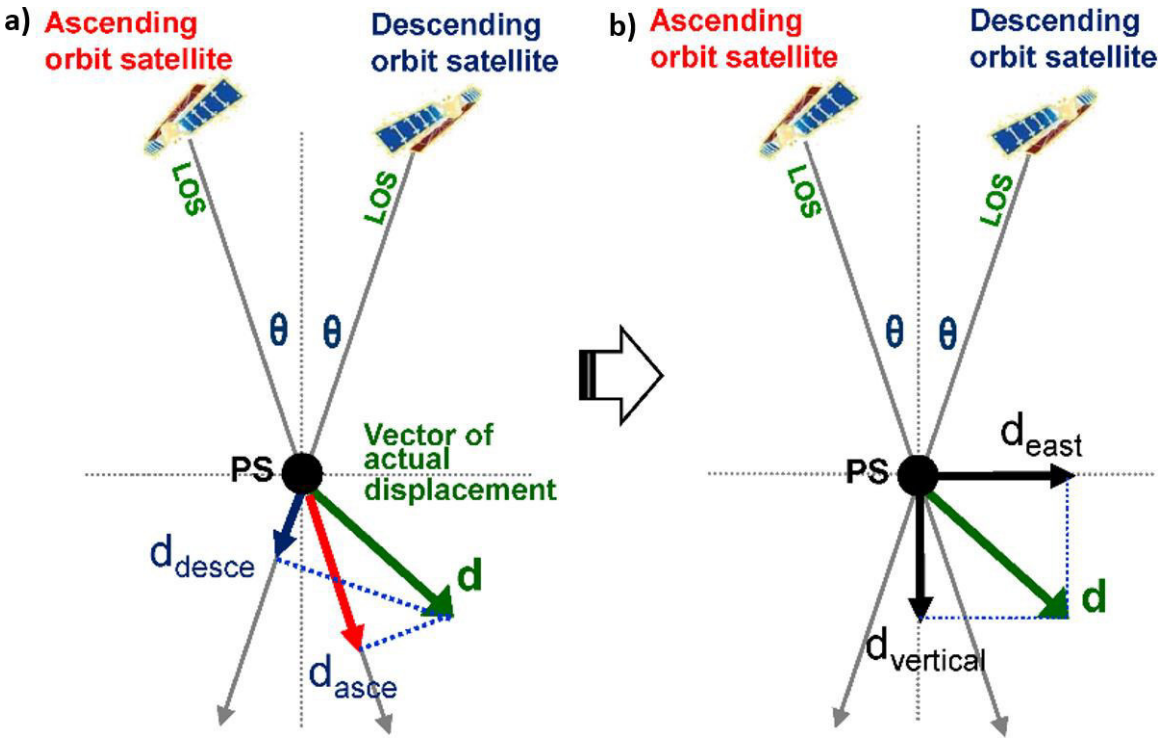


Figure 22 - The satellite SAR imaging geometry along the ascending and descending orbits and the projection relation between the LOS displacements and the 3-D motion components. The a) combination of movement components along the ascending (d_{asce}) and descending (d_{desce}) LOS directions allows for quantification of actual displacements (d) and, consequently; b) displacement components along both vertical ($d_{vertical}$) and west-east (d_{east}) directions.

Whenever two data sets of SAR images are available, acquired over the same area and during the same time frame along ascending and descending orbits, the SAR results can be used successfully to estimate two components of the local displacement, that is, the vertical ($d_{vertical}$) and the west-east (d_{east}) components, thus significantly improving our understanding of the event under study as illustrated for the Phoenix, Arizona, USA area in Figure 23. The following system of equations can be used to make the determinations (Pepe and Calò, 2017).

$$\begin{bmatrix} d_{vertical} \\ d_{east} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{d_{asce} - d_{desce}}{2 \sin \theta} \\ \dfrac{d_{asce} + d_{desce}}{2 \cos \theta} \end{bmatrix}$$

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

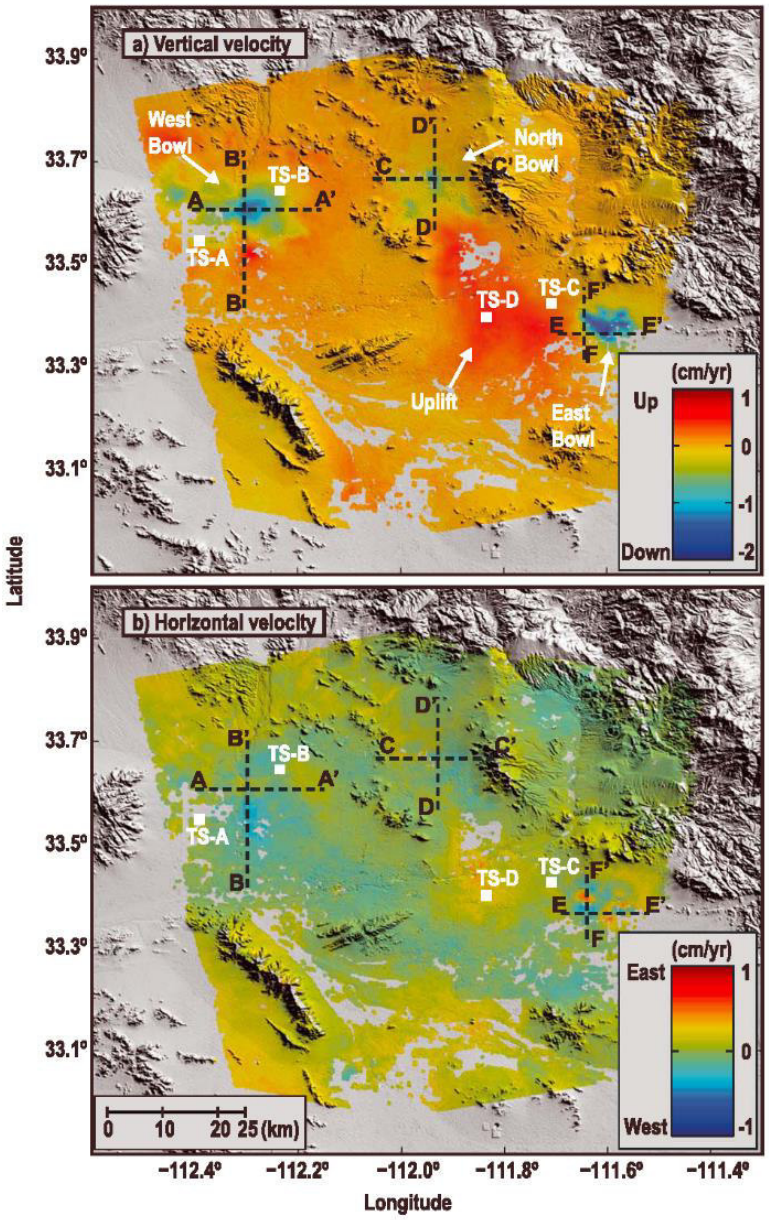


Figure 23 – In the Phoenix, Arizona, USA metropolitan area: a) vertical and b) horizontal velocity maps from ENVISAT ascending and descending combined data sets (modified from Miller and Shirzaei, 2015).

SAR processing-chains can provide millions of data points over a large region ($1x10^4$ to $1x10^5$ points per km^2) and are often less expensive than sparse point measurements from "traditional" labor-intensive spirit-leveling and costly C-GPS stations. Moreover, SAR results have shown that land displacements due to groundwater withdrawal and injection are characterized by a spatial variability almost impossible to detect by other surveying techniques. For these reasons, leveling and GPS have been used less and less over recent years to measure land subsidence. However, we emphasize that they remain of paramount importance in calibrating the SAR outcome as described above, and are essential in providing measurements over natural terrain, densely vegetated zones,

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

or farmlands where the SAR signal loses coherence and the interferometric algorithm cannot be applied.

3.4 Borehole Extensometer

Continuous measurements of soil deformation in a (normally small) number of locations in a subsiding area have been carried out using borehole extensometers. They are used to measure the change in the distance between the land surface and a subsurface benchmark situated at the bottom of a deep borehole. If the subsurface benchmark is established below the base of the compacting aquifer system or in the bedrock, the extensometer can be used as the stable reference for local geodetic surveys. The first borehole extensometer was installed in 1955 by the United States Geological Survey in the San Joaquin Valley, California, USA (Poland, 1984). Since then, extensometer technology has seen progressive improvement, playing an important role in relating land subsidence to the compaction of confined aquifer systems.

Several types of early borehole extensometers are reviewed by Poland (1984). Recently, anchored cable counterweighted extensometers and slip-joint casing extensometers have been widely used. The measuring devices are schematically shown in Figures 24a and 24b. A typical cable counterweighted extensometer tool consists of a balance beam carrying a cable or a pipe, which is fastened at one end to an anchor weight located at the bottom of the compacting system, and at the other end to a counterweight keeping the cable at a constant tension (Figure 24a). To build up a sliding-joint casing extensometer, a hole is drilled to a depth where rock is stable. The hole is then lined with a steel casing with slip-joints to prevent crumpling as subsidence occurs. An inner pipe rests on a concrete plug at the bottom of the borehole and extends to the top. This inner pipe then transfers the stable elevation to the surface. Measurement of the distance from the inner pipe to the surrounding land surface provides the amount of compaction that has occurred over a given time interval (Figure 24b). A computer-controlled system records the compaction data against time. The instrumental precision heavily depends on the actual extensometer implementation, but a nominal deformation resolution of 0.01-0.1 mm can be achieved over a 200-1000 m depth (Riley, 1986).

In the case of multi-aquifer systems, extensometer stations are composed of close multiple-borehole extensometers installed at different depths, so as to derive the deformation of each single formation by subtracting the records acquired at various depths. A recent alternative to multiple- extensometer stations are multiple-position borehole extensometers that incorporate a number of independent markers anchored to the formation borehole at different depths (Figure 24c). Magnetic markers have been used in Taiwan (Hwang et al., 2008; Hung et al., 2012) to compute vertical compaction in boreholes using repeat borehole logging with magnetic sensors on calibrated lines or tapes in order to measure temporal changes in marker positions. This method is capable of monitoring

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

from ten to several tens of marker positions in a single borehole at measurement resolutions of about 1-2 mm over a depth of several hundred meters.

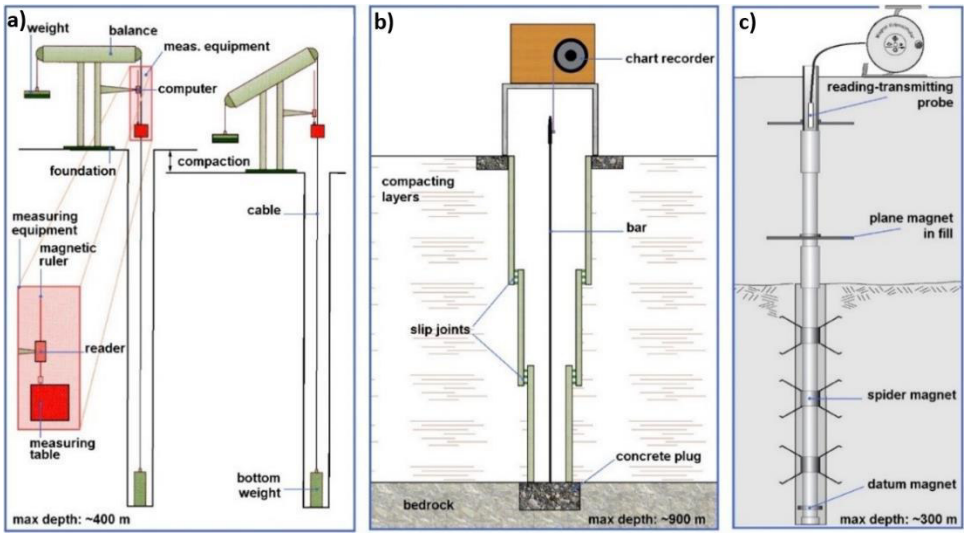


Figure 24 - Schematic representation of a) a single-layer cable extensometer; b) a slip-joint casing extensometer; and, c) a multilayer magnetic borehole extensometer used to record the deformation of aquifer-aquitard systems.

A relatively dense network of extensometer stations has been established in metropolitan areas experiencing significant land subsidence. Two major examples are Houston, Texas, USA and Shanghai, China. The Houston-Galveston area is an extreme example of subsidence hazards, a problem that affects many other USA metropolitan areas, for example: Los Angeles, California; Sacramento, California; and New Orleans, Louisiana. Portions of Houston experienced severe settlement, up to 3 m, from 1915 to 2001. The United States Geological Survey has been operating 13 borehole extensometers at 11 sites since 1973 for the purpose of observing compaction of aquifers in the area. The borehole extensometers, which were designed according to the sliding-joint casing type, span a depth down to 936 m (Yu et al., 2014). Shanghai is the first city in China where land subsidence was investigated and monitored, being one of the country's most densely populated and developed areas. The maximum cumulative land subsidence was 2.6 m in 2002 and the total area of land subsidence was about 5000 km^2 in 2006. A number of the 27 extensometer groups have been used since the 1960s to monitor compaction of individual aquifers and aquitards to a depth of approximately 350 m (Wu et al., 2010).

Horizontal extensometers were used to measure differential horizontal ground motion at earth fissures caused by changes in groundwater levels in South-Central Arizona, USA (Carpenter, 1993). Buried horizontal extensometers made of quartz tubes or invar wires were used to precisely and continuously measure fissure opening in a natural environment over a scale of 330 m. Following enlargement of the ground rupture occurrence in several countries worldwide, other specific mechanical and optical instrumentation has recently been developed and used in urban areas such as Iztapalapa,

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Mexico City, Mexico (Carreon-Freyre et al., 2010), and Beijing, China (Zhu et al., 2015). These monitoring stations allow one to accurately measure the relative displacements characterizing the rupture in a 1-D (only opening) or 3-D (opening and sliding) reference system as shown in Figure 25.

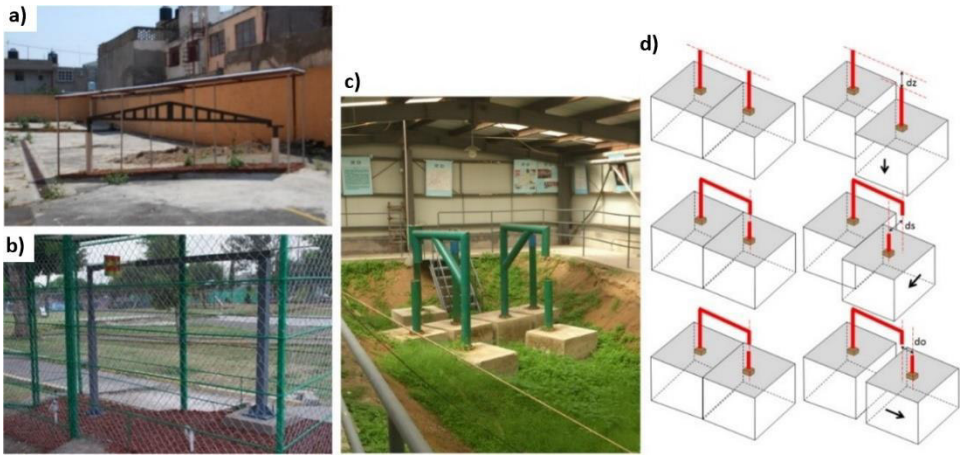


Figure 25 - Some examples of ad hoc instrumentation developed to monitor opening and sliding of earth fissures or faults activated by the overdraft of aquifer resources. a) 1-D apparatus and b) 3-D apparatus established in Iztapalapa, Mexico City, Mexico (courtesy of Dora Carreon-Freyre, Centro de Geociencias, National Autonomous University of Mexico). c) 3-D instrumentation installed in the northern Beijing plain (courtesy of Lin Zhu, Normal Capital University, Beijing, China). d) A sketch showing how 3-D movements can be measured through the apparatus established in the Beijing plain.

3.5 Fiber Optics

Following the development and large use for monitoring civil infrastructures, distributed fiber optic sensors (FOS) have become even more popular in the recent years to perform real-time observations and provide early warning of natural and anthropogenic geo-hazards, such as landslides (Schenato et al., 2017), debris flows, land subsidence (Wu et al., 2015), and earth fissures (Liu et al., 2017). The common assumption that enables the sensing feature in optical fibers is that the surrounding environment affects the local properties of the fiber itself: the back-propagating light generated when an optical signal is fed into the fiber is used to investigate the local properties of the fiber, and therefore to figure out the changes in the surrounding environment. Very simply, local temperature and strain intrinsically influence frequency and intensity of the scattered signal and therefore variations of temperatures, displacements, loads, earth pressures, pore water pressures and soil moistures can be captured with high accuracy. Schenato (2017) and Zhu et al. (2017) provide accurate reviews of the state-of-the-art.

In Japan, a FOS system has been introduced in boreholes to monitor formation compaction accompanying the exploitation of natural gases (Ikeda et al., 2015). Wu et al. (2015) initiated a study on applying FOS to land subsidence monitoring in Suzhou, China, where a complex multi-aquifer system has been over-drafted during recent decades. The fully distributed strain sensing cables were vertically installed in boreholes for

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

displacement monitoring. The borehole was filled with a fine sand-gravel-bentonite mixture after the cables were installed, and no strategies for temperature compensation were adopted. The displacements were calculated based on the axial strain measurements of the cables.

Liu et al. (2017) investigated the feasibility of using fixed-point distributed optical fiber sensor in earth fissure monitoring. To improve the fiber strength, the structure of the cable was made of three layers from the core to the outer coating materials: the bare-optical fiber, a polyurethane coating, and a spiral-shaped metal sheath. Five-centimeter-long sections of cable were further encased into an aluminum alloy tube and placed in a heat-shrinkable tube (10 cm-long) at regular distances. These raised portions of cable were used to anchor the cable to the ground with nails. The distance between anchors was fixed to 2 m after careful consideration, and the cable was pre-stressed during installation. Additional strain-free cables were measured for temperature compensation. The sensor system was successfully used in an earth fissure site in Wuxi, China, where two main ground fissures (with a maximum strain value of 360 $\mu\varepsilon$, that is, 360×10^{-6}) were detected and measured (Figure 26).

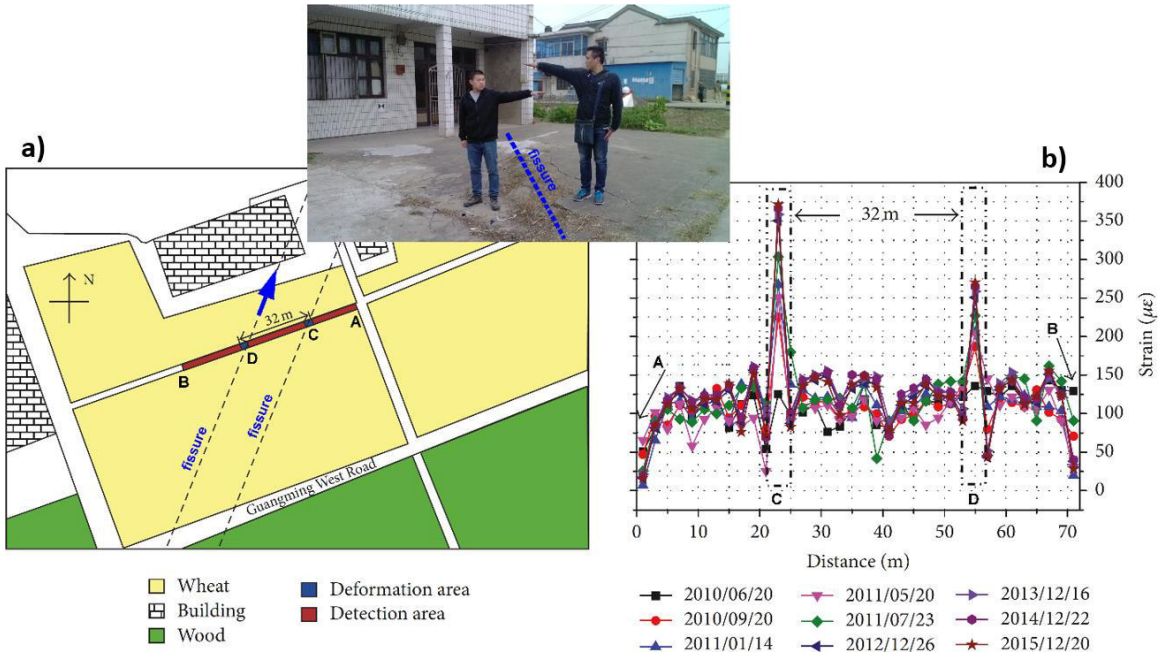


Figure 26 - a) Map with the trace of the earth fissures in Wuxi, China, and the location of the FOS monitoring equipment. The blue arrow represents the orientation of the photo shown in the inset. b) Strain distribution along the cable: the two peaks correspond with the main ground fissures (modified after Liu et al., 2017).

4 Mitigation of Land Subsidence by Water Injection

The simplest, most straightforward action toward mitigating land subsidence caused by fluid withdrawal would seem to be artificial fluid injection. It goes without saying that other strategies can help to prevent land subsidence, including the policy of requiring withdrawal limits, permits, fees, taxes, metering, and enforcement control on

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

groundwater pumping as exercised by central and local authorities. Freeze (2000) conveys the general recommendation that land subsidence should act as a guiding factor when defining a groundwater exploitation management strategy, along with more traditional factors, such as water table decline, saltwater intrusion, and avoidance of groundwater contamination.

Generally speaking, when land subsidence has occurred and/or is still occurring, methods used to control, mitigate, or arrest it include reduction of pumping rates, artificial aquifer recharge from the land surface, re-pressurization of depleted layers by way of injection wells, creation of a hydraulic barrier to stop advancement of the cone of depression, and generation of an overpressure in geological units unaffected by pumping in order to build a structural obstacle to the migration of in-depth compaction to the ground surface. A combination of any of the above methods can be used as well, consistent with a cost/benefit analysis. An example of conservative mitigation strategy is one whereby the effective stress within the depleted formation does not increase beyond the stress level experienced to date. A more aggressive strategy might dictate a decrease in the effective stress and/or the active involvement of overlying formations through the use of fluid injection. Injecting water into a geological formation generates an increase in pore pressure, a decrease in effective stress, and hence an expansion of the injected formation. Part of the latter may migrate to the ground surface, giving rise to an anthropogenic land rebound and/or uplift.

While anthropogenic land subsidence is a well-known process, the reverse, namely artificial land uplift, is a much less observed and recognized event, even though the practice of injecting fluids underground is more than a half a century old. Injection technology has been advancing continuously since it came into wide use in the 1950s and 1960s in order to reinject the formation water extracted along with hydrocarbons, or to dispose of industrial wastes. The number of injection wells has grown exponentially, to the point that EPA (the United States Environmental Protection Agency) has identified approximately 400,000 injection boreholes in the USA alone (USEPA, 2002). The injection of water-based solutions, hydrocarbons, CO_2 or N_2 to enhance oil production (EOR) started in the 1940s and soon became an accepted technique for recovering additional oil from reservoirs that were already depleted or water flooded. Thermal recovery processes by vapor injection, used in reservoirs containing heavy (viscous) oil or bitumen, are generally accompanied by an noticeable uplift (for example, locally recorded up to 30 cm). Examples include the Cold Lake (Stancliffe and van der Kooij, 2001), Shell Peace River (Du et al., 2008), and Athabasca oil sands (Collins, 2007), in Canada.

In the Krechba gas field, Algeria, land rebound was caused by the reinjection of CO_2 separated from the produced gas (Vasco et al., 2010). Storing gas underground may generate measurable land uplift as well (Teatini et al., 2011a). The aquifer systems underlying Tokyo and Osaka, Japan (Sreng et al., 2011) and Taipei, Northern Taiwan (Chen et al., 2007), experienced a natural flow field recovery after cutting the water pumpage, and

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

significant land rebound as well. There are also examples of water being pumped into an oil field to mitigate land subsidence caused by oil production, including the case of Long Beach, California, USA. Here the mitigation program was carefully controlled and monitored (Pierce, 1970; Rintoul, 1981; Colazas and Strehle, 1995). Water injection started on a major scale in 1958 using appropriately treated seawater collected from shallow wells 30–120 m deep, later mixed with formation wastewaters produced with the oil. Eleven years later, when 2 m^3/s was being pumped into the oil field, the settling area had been reduced from 58 to 8 km^2, with local land surface rebound of 30 cm.

Land motion related to subsurface fluid injection went unnoticed for a long time in the vast majority of cases. There are a number of reasons for this. First, in most cases, the disposal of fluids occurred in deserted or sparsely inhabited areas where measuring surface displacements was not a priority, in part due to the large cost of leveling surveys. In other instances, uplift was so slight that no environmental hazards were created, no monitoring was installed, or the area involved was quite limited, with no damage to engineered structures or infrastructures reported or even expected. Only in recent times has satellite technology offered a relatively inexpensive, spatially distributed, accurate methodology for detecting ground movements worldwide. It has revealed anthropogenic uplifts of some interest in terms of magnitude, size of the area involved, and time of occurrence. The use of SAR-based techniques has grown rapidly over the last decade, facilitating the detection and measurement of rising areas. This is particularly true for surface movements connected with natural fluctuations of the groundwater head and in areas of aquifer storage and recovery (ASR), which have been systematically monitored by the United States Geological Survey: including, among others, Santa Clara Valley, California, USA (Schmidt and Burgmann, 2003), Santa Ana basin, California, USA (Galloway and Hoffmann, 2007), and Las Vegas Valley, Nevada, USA (Hoffmann et al., 2001; Bell et al., 2008). Measured uplift amounted to 4 cm from 1992 to 1999 in Santa Clara Valley and 3 cm from 2003 to 2005 in Las Vegas Valley. In addition, surface and borehole tiltmeters have been widely used in recent years to monitor ground heave within relatively small areas (Du et al., 2008). Teatini et al. (2011b) provide a recent thorough review of areas uplifted anthropogenically by injecting fluid underground.

As far as soil compressibility is concerned, the value of c_b in the first loading cycle is to be used if the aquifer is pumped, and in unloading/reloading when the aquifer is recharged/repressurized. The ratio $c_{b,loading}/c_{b,unloading}$ decreases with depth and may approach 1 order of magnitude for very shallow silty/clayey sediments (Teatini et al., 2011b).

Because of their low elevation and location on the sea, Shanghai in China and Venice in Italy represent two special cases where land subsidence mitigation is of paramount importance. Shanghai, a coastal city situated in the southern part of the Yangtze Delta, China, has experienced a large land subsidence (Table 1) due mainly to excessive long-term groundwater withdrawal and, secondarily, to the rapid development of the area.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Groundwater extraction in Shanghai dates back to 1860. The pumped water volume was quite small before 1949 and then it increased rapidly, especially in the late 1950s. The yearly pumping rate reached its peak of 200×10^6 m^3/year in 1963 (Figure 27a). Intensive groundwater extraction has caused severe land subsidence. During the period 1957–1961, the maximum yearly rate of subsidence peaked up to 17 cm/year as shown in Figure 27a (Zhang et al., 2015, Ye et al., 2016).

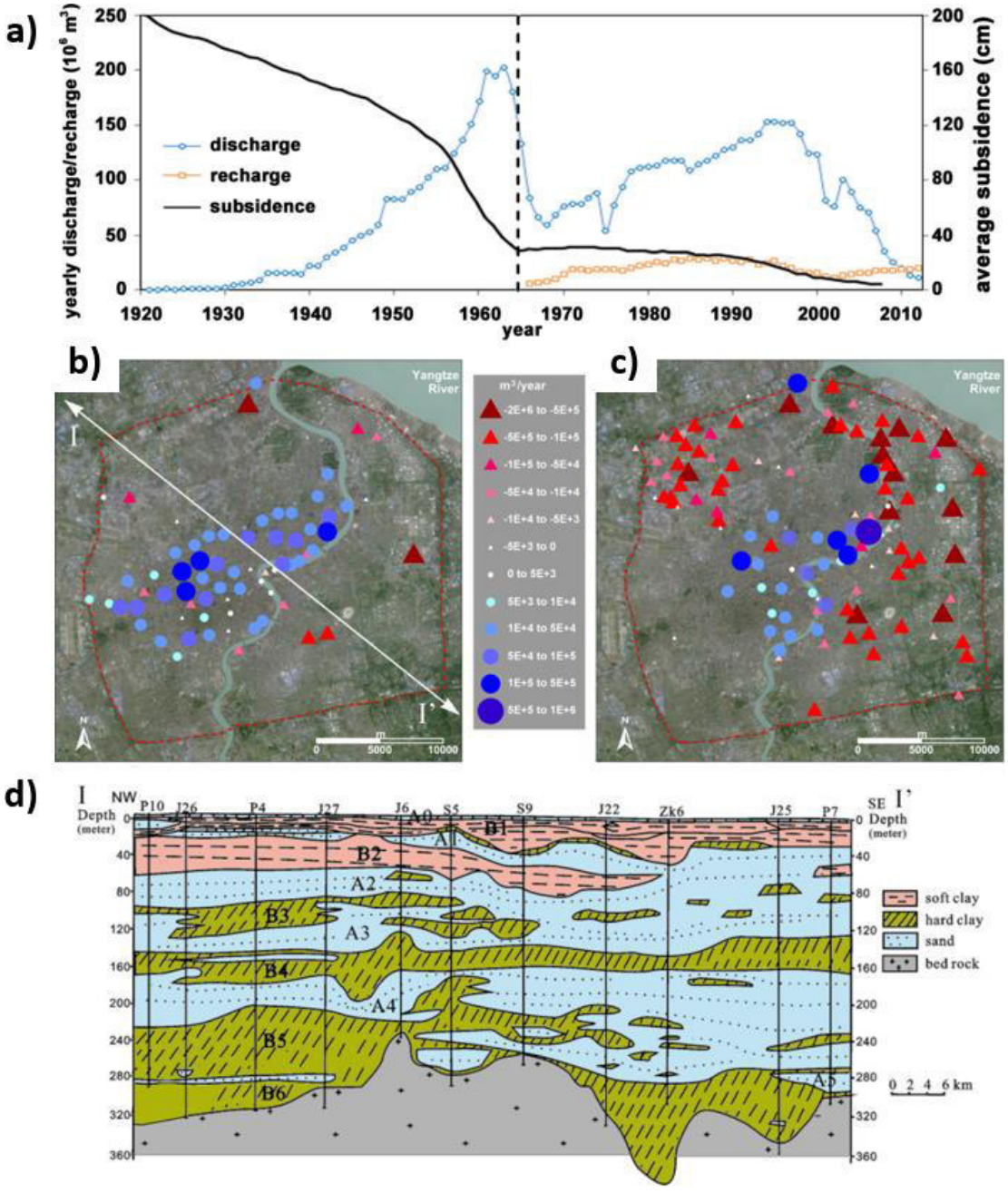


Figure 27 - a) History of groundwater pumping, artificial recharge, and average land subsidence in Shanghai (modified after Zhang et al., 2015). Pumping and recharge wells in b) aquifer A2 and c) aquifer A4 in Shanghai. The white-to-red triangles represent pumping wells (negative values), white-to-blue circles represent recharge wells (positive values). Symbol size is proportional to the average yearly rate from 1980 to 1996 (modified from Ye et al., 2016). d) Representative hydrogeological section of the Shanghai aquifer system along the cross-section I-I' shown in (b) (modified from Ye et al., 2016).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

In order to control land subsidence, a series of measures were implemented by the Shanghai government beginning in the 1960s. These measures include:

- reduction of groundwater withdrawal;
- exploitation of deeper producing layers; and,
- artificial recharge of aquifers.

Pumping gradually moved from the second (A2) and third (A3) confined aquifer to the fourth (A4) and fifth (A5) aquifers, with decreasing yearly pumpage since 1998. Artificial recharge started in 1966 and slightly increased in the following years. The recharge has been carried out using properly treated tap water taken from the Huangpu River. Over the period 1983–1989, the yearly injection rate was nearly constant at 30×10^6 m^3/year. After that, it decreased slowly and increased year after year since 2003 (Figure 27a).

Figures 27b and 27c show the discharge and recharge wells in aquifers A2 and A4, along with the average annual discharge and recharge rates over the period 1980-1996. The number of recharge wells was much larger than the number of pumping wells in aquifer A2. Conversely, several pumping wells with high flow rates and a few recharge wells were active in aquifer A4. Because of the implementation of the above mitigation measures, land subsidence recently decreased to about 1 cm/year.

In Venice, land uplift is predicted with the aid of a finite element (FE) model (Figure 28a). An upheaval of the city induced by seawater injection into deep saline aquifers could significantly reduce the frequency of the high tides that periodically flood Venice. A recent exceptional high tide on November 12, 2019, peaked at 187 cm above datum and severely damaged the city (https://www.voanews.com/europe/venice-mayor-declares-disaster-city-hit-2nd-worst-high-tide↗). Early numerical studies based on a simplified lithostratigraphy of the Venetian subsurface (Comerlati et al., 2004) suggested that the city might be raised by pumping seawater into deep aquifers through 12 wells located on a 10 km diameter circle. Using a more accurate 3-D reconstruction of the Quaternary deposits, developed very recently from about 1050 km of multichannel seismic profiles and eight exploration wells, along with a more accurate representation of the injection boreholes, new FE predictions were performed (Teatini et al., 2011c). The new model simulates the lithostratigraphy of the lagoon subsurface and allows for a reliable assessment of the water volumes injected into the geologic formations based on the measured bottomhole overpressures, which vary both in space and time. Selection of the best hydraulic conductivity is discussed by Teatini et al. (2010), while rock compressibility in the unloading condition has been derived in agreement with Comerlati et al. (2004) and Ferronato et al. (2013). Pumping is planned along two Pleistocene sequences originating from the Alps and Apennines sedimentation and terminating just south and north of Venice, respectively, and the shelf portion of a rather continuous Pliocene sequence below the central lagoon, with arenite layers as deep as 1000 m below mean sea level. With a proper tuning of the injection pressure, the model (Teatini et al., 2011c) allows for

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

prediction of a fairly uniform 25-30 cm uplift over 10 years after the initiation of injection (Figure 28b).

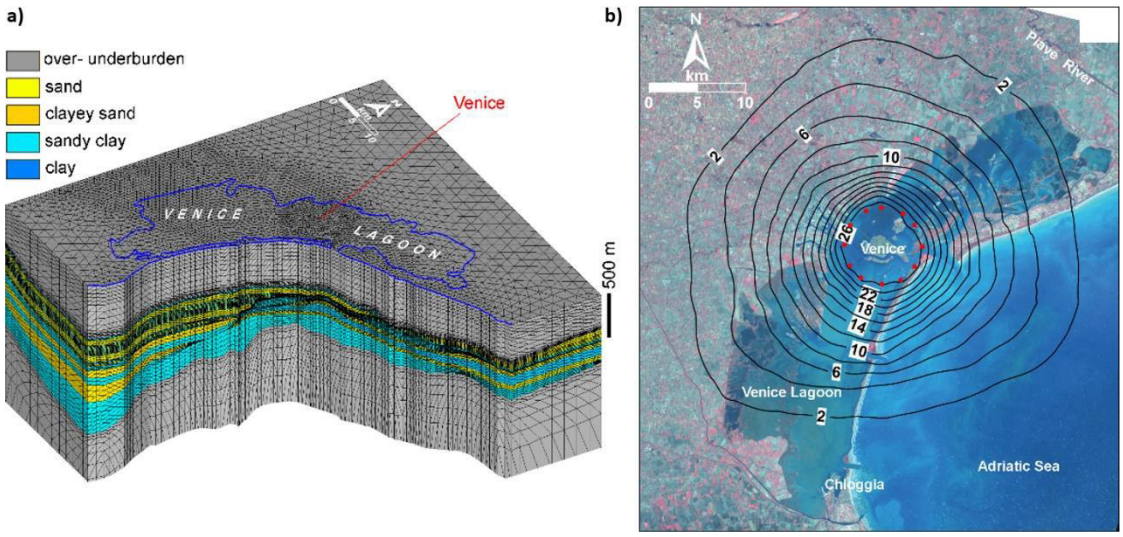


Figure 28 - a) Axonometric view of the tetrahedral mesh used to predict the anthropogenic uplift of Venice by seawater injection into saline aquifers. The mesh has 1,905,058 elements and 328,215 nodes. b) Predicted uplift (cm) at Venice after 10 years of injection into saline aquifers 650–1000 m deep below the lagoon. The injection wells are marked in red (modified after Teatini et al., 2011c).

A pilot experiment has been designed to verify the feasibility of the project for uplifting Venice (Castelletto et al., 2008). The pilot experiment plan foresees three boreholes located at the vertices of a triangle with sides 1 km long, in a lagoon area to be selected in the vicinity of Venice's historical center. The aim would be (1) to obtain further detailed lithostratigraphy of the underground lagoon; (2) to perform an injection test with (treated) seawater and measure the overpressure generated in the injected formation; (3) to monitor continuously and in real time land uplift in the area, with the aid of high-precision leveling, GPS, and satellite interferometry; and (4) to set up and experiment with a procedure of optimal control; for instance, the uniformity of uplift may be checked with the aid of sensor feedback automatically accommodating the injection rate in each single well. A detailed description of the project for anthropogenic uplift of Venice, its major environmental impact, and expected cost is provided by Gambolati and Teatini (2014).

5 Geomechanical Processes Related to Anthropogenic Land Subsidence

Apart from compaction or expansion, pore pressure change in the pumped or injected formation may induce other geomechanical processes, for example, the generation of local fractures that may extend to the ground surface, reactivation of preexisting faults, with a sharp increase in hydraulic conductivity, and reduction in strength. The consequences may greatly affect surface structures and infrastructures and expose aquifers to the risk of contamination.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

The description of these mechanisms can be done with the aid of the Mohr-Coulomb representation of the effective stress state in the (σ,τ)-plane as shown in Figure 29, where compressive stresses are marked as positive. When water is removed, the pore pressure p decreases with respect to the original value ($p < p_0$) and the effective stress σ increases in accordance with Terzaghi's principle. Hence, Mohr-Coulombs circle moves right-ward, that is, farther from the shear-τ-axis and generally, from the failure line bounding the envelope of the allowable stress states. In contrast, when fluid is injected p rises and may exceed p_0. In this case, the effective stress falls below the original in situ value, with Mohr-Coulombs circle moving left-ward, that is, toward the τ-axis and generally, the failure line. It is worth pointing out that during both pumping and injection, the maximum (σ_1) and minimum (σ_3) effective stresses may follow different paths, possibly creating an increase in the diameter of Mohr-Coulombs circle that approaches the failure line as shown in Figure 29 (Teufel et al., 1991; Segall and Fitzgerald, 1996). Notice that external stresses, that is, tectonic stresses, are assumed to be constant over the time period of an aquifer or reservoir production life (a few decades as a maximum). By distinction, the principal stress orientation and the ratio σ_1/σ_3 change significantly with depth (Zoback, 2007).

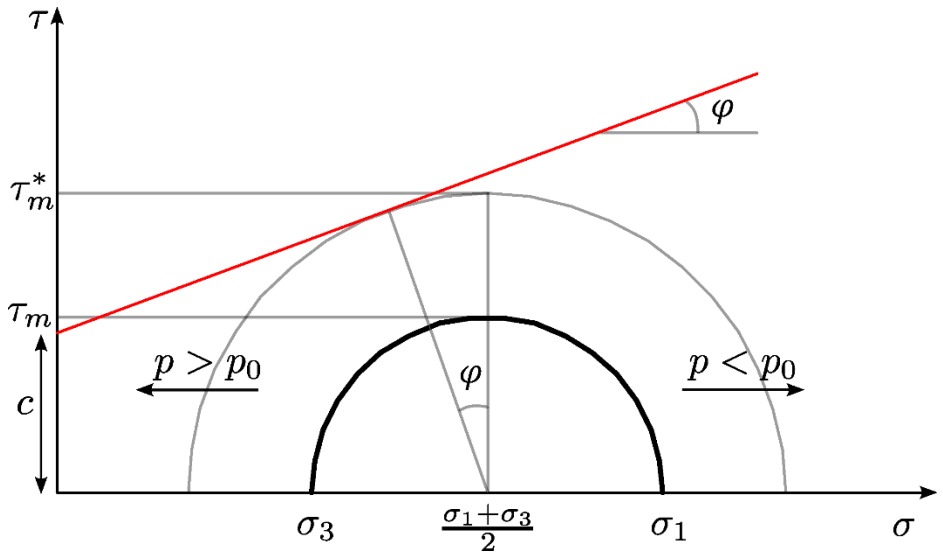


Figure 29 - Mohr-Coulomb's circles. When the pore pressure p increases because of fluid injection, the circles move left-ward and may achieve the limiting yield surface or friction line $\tau = c + \sigma tan\varphi$ where σ and τ are the normal and shear stress, respectively, c is the cohesion and φ is the friction angle. τ_m and τ_m^* are the current largest and maximum allowable shear stress, respectively, σ_1 and σ_3 are the maximum and minimum principal stress, respectively.

Two failure mechanisms may occur: a) if Mohr-Coulombs circle touches the envelope line a shear failure may ensue or a preexisting fault/thrust may be activated, and b) if Mohr-Coulombs circle crosses the τ-axis a tensile failure takes place. Moreover, a dilation (or dilatancy) phenomenon may be induced, that is, an increase in volumetric strain due to shear, increasing the magnitude of the injected formation's expansion. Shear dilation accompanies yield and strain weakening with permanent alteration in the fabric of

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

the fluid-bearing stratum through irreversible deformation, grain rearrangement, permeability change and porosity increase, potentially contributing to a measurable rebound of the land surface (Zoback, 2007).

5.1 Ground Ruptures

Ground ruptures associated with land subsidence caused by groundwater withdrawal have been reported from many alluvial basins in semiarid and arid regions since the late 1970s. Examples occur in the southwestern USA (Holzer et al., 1979; Jachens and Holzer, 1979; and, Holzer and Galloway, 2005), central Mexico (Pacheco et al., 2006; and Carreon-Freyre et al., 2016), Iran (Ziaie et al., 2009; and Mahmoudpour et al., 2013), Saudi Arabia (Bankher and Al-Harthia, 1999), Pakistan (Khan et al., 2013), and China (Shi et al., 2007; Wang et al., 2009; and He et al., 2017).

Fissure development has been observed both within areas where natural resources are exploited and along the area boundaries. Density, shape, length, aperture, depth, and dislocation of the fissures vary greatly from site to site, and are mainly related to subsoil lithostratigraphic variations. In several places only a few isolated fissures have formed; in others, many. Fissures vertically dislocated more than 2 m have been observed, up to 15 km long, 1-2 m wide, and 15-20 m deep. Considerable economic, social, and environmental damage is reported. Damage includes the rupture of borehole casings, pipes, and canals used for withdrawing groundwater and conveying water, oil and gas. Impacts occur in both rural zones, where the water is mainly used for crop production (for example, in the Sarir agricultural area, Libyan desert, and in southcentral Arizona, USA), as well as in urban areas (for example, in Mexico City, Queretaro, Mexico, and Celaya located within the Trans-Mexican Volcanic Belt in Mexico; in Beijing, Xian, and Wuxi China). Other consequences include the reduction of potable water supplies; cost increases for groundwater extraction; damage to surface structures (for example, houses, historical palaces, churches, and other buildings); cracking of infrastructure such as streets, water pipes, railways, and runways; injuries to livestock and other animals as well as to people; creation of preferential flow paths for contaminants from the surface into shallow aquifers, and triggering of severe soil erosion and creation of badlands topography near the rupture (Figure 30).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.



Figure 30 - A few examples of earth fissures due to groundwater pumping in a) Arizona, USA (courtesy of Joe Cook, Arizona Geological Survey, Tucson, AZ); b) damaging a house in Shunyi, Beijing, China (courtesy of Lin Zhu, Normal Capital University, Beijing, China); and, c) in Quetta, Pakistan (courtesy of Najeebullah Kakar, University of Balochistan, Quetta, Pakistan).

Several mechanisms have been proposed to explain the origin of ground rupture associated with the development of natural resources. Representations of a few proposed mechanisms are shown in Figure 31 (Holzer et al., 1979; Sheng and Helm, 1998; and Sheng et al., 2003). According to the direction of pumping-induced stresses below the surface, we may identify two main types of ground rupture: tensile fissures and shear fissures (Holzer and Pampeyan, 1981). The main difference between these two fissure types is the vertical offset observed in the field. Typically, tensile-induced earth fissures create slight or no offsets, while shear-induced earth failures have measurable scarps (Holzer and Pampeyan, 1981). However, this distinction may be difficult to recognize in urban areas, where some shear-induced ruptures initially appear without any vertical offset, as structures/infrastructures on the land surface mask the actual rupture displacements.

Starting from the early 2000s, research was mainly focused on modeling, and hence predicting, ground failure. A Mohr-Coulomb failure criterion was used by Budhu (2008) to analyze fissure initiation in heterogeneous sedimentary deposits. He found that the most potent mechanism for earth fissures formation combines bending and shearing. Geological discontinuities are the preferred location for ground failure to occur, with ruptures that initially form at the surface and then propagate downward, or vice versa, depending on the prevailing mechanisms. Using a continuum approach and the ABAQUS geomechanical simulator software (https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/↗), Hernandez-Marin and Burbey (2010, 2012) studied the spatial distribution of deformation, and normal and shear stresses that potentially lead to the formation of ground ruptures. Their results indicate that the presence of a preexisting fault zone largely controls the

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

deformation and stress regime of the porous medium during pumping, with areas of stress accumulation that may eventually lead to fissure formation. The simulations were carried out on 2-D vertical sections representing the Las Vegas Valley.

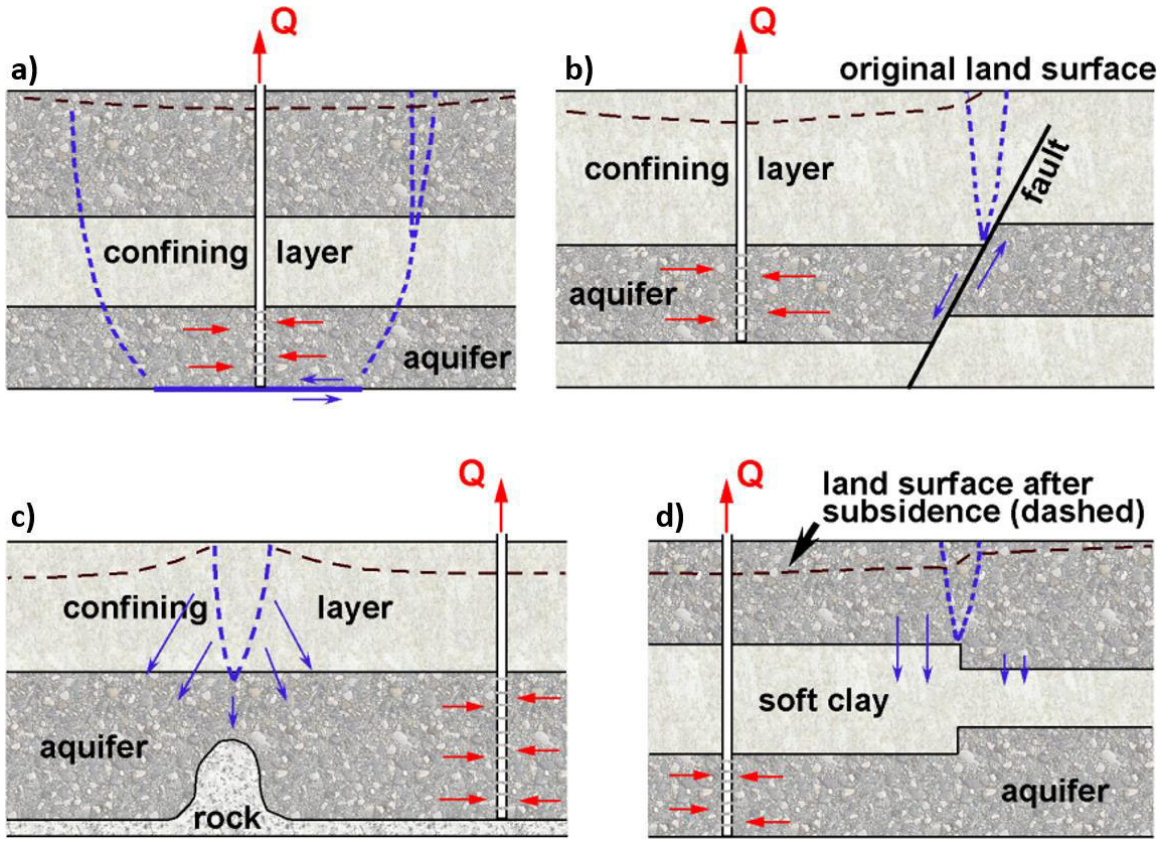


Figure 31. Sketches of some mechanisms that induce ground ruptures (dashed blue lines): a) horizontal displacement due to shearing on the plane of weakness or to tensile failure; b) reactivation of an existing fault caused by horizontal displacements; c) tensile fracture above a bedrock ridge; d) differential compaction due to heterogeneous thickness of [aquifer (rigid)]/[aquitard (compressible)] layers (modified after Sheng and Helm, 1998). The red and blue arrows represent the flow and displacement fields, respectively.

Recently, an original numerical approach based on "Interface Elements" (IE), developed to simulate the possible activation of regional faults due to hydrocarbon production (Ferronato et al., 2008; and, Jha and Juanes, 2014) has been used to simulate the earth fissure generation and propagation caused by groundwater pumping in Wuxi, China. Groundwater pumping between 1985 and 2004 has caused land subsidence larger than 2 m (Ye et al., 2018). The model outcomes show the presence of a shallow (~80 m deep) bedrock ridge crossing the Yangtze River delta is the key factor triggering earth fissure development in this area (Figure 32). Bending of the alluvial deposits around the ridge tip and shear stress due to the uneven piezometric change and asymmetrical shape of the bedrock have caused the earth fissure to form at the land surface and propagate downward to a maximum depth of approximately 20 to 30 m. Maximum sliding and openings are computed to be in the range of 10 to 40 cm, respectively.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

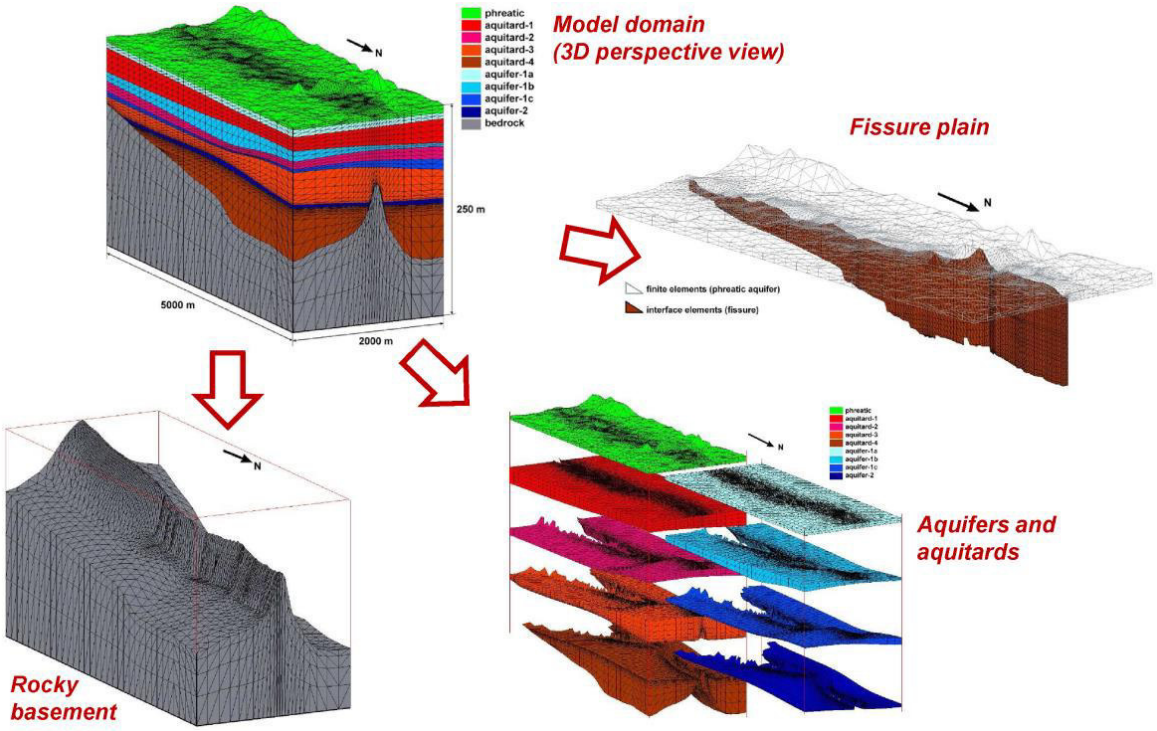


Figure 32 - 3-D FE-IE mesh developed by Ye et al. (2018) to model land subsidence and earth fissure propagation in Wuxi, China. The various geologic components (bedrock, aquifers and aquitards, fissure) are highlighted with different colors and enlarged in the sub-panels (modified from Ye et al, 2018).

The geomechanical model of earth fissuring and fissure activation is based on the structural equations of poroelasticity (as discussed in Box 3↴) solved in a three-dimensional setting with the aid of the FE-IE approach. While standard FEs are used to represent a continuum, IEs prove especially effective in examining the relative displacements of adjacent elements, such as the opening and slippage of preexisting faults or the generation of new fractures (using an elastoplastic constitutive law based on the Mohr-Coulomb failure criterion). A zero-thickness IE compatible with linear FE consists of a pair of linear elements (1-D in a 2-D problem, 2-D in a 3-D problem) with the opposite nodes coinciding. The interface displacements in the local reference frame associated with each element are the aperture δ_n and the slippage δ_{s1} and δ_{s2} between the "top" and the "bottom" face of the element. The displacement components are related to the interface stresses σ_n, τ_{s1}, and τ_{s2}, with σ_n taken as the normal stress (negative in compression, positive in expansion), and τ_{s1} and τ_{s2} as the shear stress components in the interface plane. Irreversible plastic displacements of the interface may take place wherever the limiting tensile or the shear strength are exceeded. Assuming conservatively that no tensile strength is allowed, the opening of fissure/fault surfaces occurs when the stress normal to the interface plane, that is, σ_n, becomes positive. Irreversible slip occurs when the Mohr-Coulomb failure criterion is violated. Sealing fissures, that is, ones with a no-flux surface, are simulated allowing the pressure gradient acting on the contact surface to be different.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Ground ruptures are the focus of the recently funded UNESCO-IGCP641 project M3EF3 (Mechanisms, Monitoring and Modeling Earth Fissure generation and Fault activation due to subsurface Fluid exploitation). A large amount of material about ground ruptures can be found in the project website (http://www.igcp641.org/↗).

5.2 Induced Seismicity

In recent years, concerns have been raised about the risk of inducing or triggering seismic activity as a consequence of pumping water from or injecting water into geologic formations (Ellsworth, 2013). Very recently, injection-induced earthquakes have become a discussion topic and a focus for research in connection with (i) hydraulic fracturing of tight shale formations for hydrocarbon production; (ii) disposal of wastewaters; and (iii) enhanced geothermal systems. The activation of thrusts/faults caused by groundwater withdrawal (as well as by fluid injection) may pose a serious hazard of anthropogenic seismicity. According to Ellsworth (2013), the mechanism responsible for inducing seismicity "appears to be the well-understood process of weakening a pre-existing fault" by changing the fault loading conditions. In essence, "increasing the shear stress, reducing the normal stress and/or elevating the pore pressure can bring the fault to failure triggering the nucleation of an earthquake" (Figure 33). The number of earthquakes with magnitude $M \geq 3$ recorded annually in the USA midcontinent has grown significantly since 2001, with anthropogenic earthquakes suspected as being largely responsible for the increase. Magnitudes are usually determined from measurements of an earthquake's seismic waves as recorded on a seismogram. Notice that the M scale is logarithmic, so that each unit represents a ten-fold increase in the amplitude of the seismic waves. The value $M = 3$ characterizes “minor” events, i.e., events often felt by people, but very rarely causing damage. As the energy of a seismic wave is $10^{1.5}$ times its amplitude, each unit of magnitude represents a nearly 32-fold increase in the seismic energy (strength) of an earthquake. Earthquake initiation and propagation is site-dependent, influenced by fault frictional properties and geometry, the pre-seismic natural stress regime, stress changes induced by anthropogenic activity, and the volume of injected or pumped fluid.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

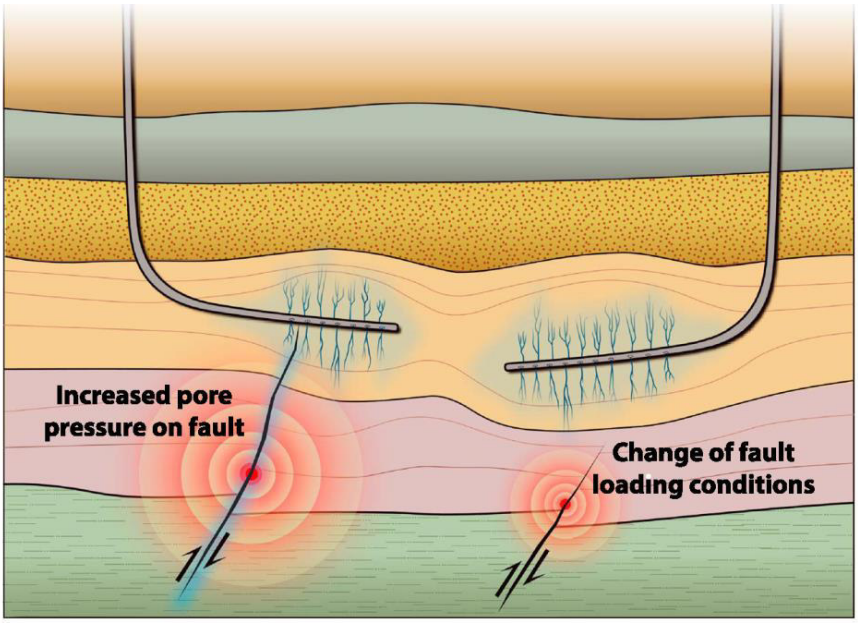


Figure 33 - Sketch of the mechanisms inducing earthquakes: (left) pore pressure increase or (right) change of the geostatic load in the vicinity of a fault. In the above cases, both the effective normal and tangential stresses acting on the fault change, causing fault reactivation (after Schultz et al., 2017).

Several cases have been reported in which micro-seismic events were correlated directly to hydraulic fracking. These cases are notable because of the public concern they raised, although the magnitudes are small, usually not creating appreciable damages. Extracting hydrocarbons from shale requires the generation of a network of open fractures connected to the producing boreholes. This is accomplished by way of a high-pressure injection of water into the formation. Thus, fracking intentionally induces numerous micro-seismic events, the vast majority of which are of $M < 1$. However, a number of cases have recently been experienced where earthquakes large enough to be felt correlated directly to hydraulic fracturing. Holland (2013) investigated a sequence of events in south-central Oklahoma, with maximum $M = 2.9$, revealing a clear temporal correlation between fracking operations in a nearby well and seismic activity. On April 2011, the Blackpool area of northern England experienced seismicity of magnitude 2.3 shortly after the hydraulic fracturing of a well to develop a shale gas reservoir in the Bowland basin (The Royal Society and the Royal Academy of Engineering, 2012).

Injection disposal wells appear to have triggered or induced several earthquake sequences in the mid-western USA. Before 2011, the $M = 4.8$ event in 1967 near Denver, Colorado, USA, was the largest event widely accepted in the scientific community as having been induced by wastewater injection (Hermann and Park,1981). By that time, the earthquakes had migrated as far as 10 km from the injection point along an ancient fault system, tracing a critical pressure front of 3.2 MPa. Wastewater disposal appears to have induced over 109 small earthquakes ($0.4 < M < 3.9$) from January 2011 to February 2012 in Youngstown, Ohio, USA, close to a deep fluid injection well. The main shocks occurred at

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

depths between 3500 and 4000 m along a fault located in the Precambrian basement (Kim, 2013). A similar situation was observed in central Arkansas, USA (Horton, 2012).

A number of studies have explored the response of water injection-induced activity in enhanced geothermal systems. The most prominent example is an M = 3.4 event induced in 2006 by the stimulation of a geothermal reservoir below the city of Basel, Switzerland, at a depth of about 5000 m (Häring et al., 2008). Thousands of smaller shocks were recorded afterward, leading insurance companies to claim over 7 million euros in damage. In 2003, at the geothermal site of Soultz-sous-Forts, France, stimulation of the 4800 m deep reservoir produced seismic events with magnitude of up to M = 2.9 in 2003 (Baisch et al., 2010). Epicenters align along a preexisting subvertical regional-scale fault structure. A hot-fractured-rock project was launched at Cooper Basin, South Australia, in 2002 to exploit the Habanero granite reservoir at a depth of 4000-4500 m. Various stimulation experiments have been conducted which triggered earthquakes with moment magnitude between 1.7 and 3.1 with hypocentral distances between 2.4 and 7.8 km and depth between 3900 and 4500 m (Baisch et al., 2010). In these cases, injection caused significant changes in the effective stress regime due to both the pressure change of the formation fluid and the thermal drawdown of the rock, increasing the likelihood of fault reactivation and consequently, induced seismicity (Gan and Elsworth, 2014).

As regards the possibility of inducing seismic events by groundwater pumping, the M = 5.1 earthquake that occurred in May 2011 in Lorca, southeast Spain, is a renowned case study. The earthquake struck the city of Lorca causing significant property damage, injuring hundreds of people and resulting in nine casualties. The hypocenter was located in a complex, active system of strike-slip faults at a depth of 3 km. According to Gonzalez et al. (2012), the event may have been triggered by the significant crustal unloading caused by the ~250 m decline in groundwater level occurring between 1960 and 2010 as a consequence of aquifer over-draft. The decrease in total stress may have relaxed the effective normal stress acting on the fault plane, thus triggering its reactivation. However, we note that there exists no general consensus in regards to the relation between piezometric lowering and the 2011 event.

When concern is raised about the possibility of inducing earthquakes, an area-wide reconnaissance study aimed at identifying major geological discontinuities is of paramount importance. These data are best used as input to a modeling tool capable of predicting fault/thrust activation resulting from the removal or injection of fluid (Ferronato et al., 2008; Gan and Elsworth, 2014; Jha and Juanes, 2014; and, Teatini et al., 2014). With the aid of an ad hoc model, we can estimate the sliding of the fault/thrust, and hence predict the seismic moment. The seismic literature presents several empirical relationships enabling us to predict the possible magnitude M induced by a fault/thrust reactivation. Recently, Mazzoldi et al. (2012) have suggested an equation based on the seismicity theory that provides an estimate of the seismic moment M_0 of a possible seismic event induced or triggered by a fault/thrust slip as expressed by Equation 29.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$M_0 = G\,\Delta L\,\Delta Z_a\,s_a \tag{29}$$

where:

ΔL = horizontal length of the activated portion of the fault/thrust (L)

ΔZ_a = height of the activated portion of the fault/thrust (L)

s_a = average slip of the fault/thrust surfaces (L)

G = shear modulus of the formation incorporating the reactivated fault/thrust ($ML^{-1}T^{-2}$)

G is related to soil compressibility through the relationship shown in Equation 30.

$$G = \frac{1}{2c_b}\frac{1-2\nu}{1-\nu} \tag{30}$$

where:

ν = Poisson's ratio (ratio of transverse strain to axial strain in simple uni-axial compression)

The seismic moment M_0 obtained from Equation 29 may be converted into a moment magnitude M used to measure the strength of the seismic event. The M_0 - M relationship was defined by (Kanamori and Anderson, 1975) as shown in Equation 31.

$$M = \frac{2}{3}(\log_{10}M_0 - 9.1) \tag{31}$$

M_0 is expressed in Newton-meters (Nm). As far as G is concerned, in Equation 30 we have to use the value of c_b in the first loading cycle if the aquifer is pumped, and in the second unloading/reloading phase if the aquifer is recharged/repressurized. As a matter of fact, seismicity during reservoir production typically occurs when the pore pressure depletion has achieved relatively high values, that is, with a stress state never experienced previously by the reservoir formation. The Groningen reservoir in The Netherlands is an example where this occurred (van Thienen-Visser and Breunese, 2015.)

6 Example of Anthropogenic Land Subsidence Calculation

We provide herewith a practical example of calculation of land subsidence due to groundwater withdrawal. Data are taken from Venice, Italy, which experienced an important anthropogenic land settlement in the second half of the twentieth century, and are summarized in Gambolati (1972). The data needed for the calculation are of two kinds. The first type comprises litho-stratigraphy of the subsoil down to the depth of interest (that is, the depth where drawdown has occurred) along with the mechanical and hydraulic properties of each stratum (considered to be homogeneous); the second type addresses the history of the piezometric decline experienced in the permeable (that is, sandy) formations

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

from which the wells pump. Table 2 shows the simplified litho-stratigraphy of the Venice area down to about 300 m depth. The compactable thickness, which differs in some cases from the total thickness, takes account of layers of sand, which are much stiffer than the layers of clay that incorporate them. Table 2 includes several aquifer levels that appear frequently in the sedimentary sequence at various locations in Venice. We refer particularly to layers 2, 4, 6, 8, 11 and 13, which are composed predominantly of sands and which host most of the pumping well intakes as well as the borehole piezometers. Of course, a more accurate subdivision of the litho-stratigraphy is possible when the underground is mapped in greater detail, thus allowing for a better classification of the strata of mixed nature.

Table 2 - Simplified stratigraphy and lithology in the Tronchetto area of Venice, Italy.

Layer	Mid-layer depth (m)	Layer thickness (m)	Compactable thickness (m)	Lithological description
1	28.0	56	45	Clay, mud, sand with clayey intercalations, sandy clay, peaty clay
2	71.5	31	31	Sand, clayey sand, alternating sand and clay
3	92.0	10	10	Prevalently clay
4	102.0	10	10	Sand with thin layers of clay
5	113.0	12	6	Alternate layers of clayey sand and clay
6	137.0	36	36	Sand, sand with clayey intercalations
7	159.0	8	8	Prevalently clay
8	168.0	10	10	Sand, clayey sand
9	194.0	22	22	Clayey sand, sand intercalated by clay
10	210.0	10	10	Prevalently clay
11	222.5	15	15	Prevalently sand
12	242.5	25	25	Prevalently clay
13	267.5	25	25	Prevalently sand, light sandstone, thin layers of light gravel
14	285.0	10	8	Alternate layers of sand and clay

Table 3 shows the piezometric levels measured in 1905 at various depths. The correlation between the depth of Table 3 and the aquifer levels of Table 2 is far from perfect. This could be due to errors in making the measurements of Table 3, but also likely is due to different geologic characteristics and the locations and depths of wells where the values of Table 3 were taken. In recent time, new data have permitted the compilation of Table 4 in which the piezometric levels of the various aquifers are average values based on a number of boreholes of the same depth.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Table 3 - Piezometric level observed in Venice as of 1905.

Measurement depth (m)	Piezometric level (m above mean sea level)
56	2.95
91	3.80
112	4.55
135	4.90
155	5.60
170	6.25
198	6.70

Table 4 - Combined data from several wells in the Venice area.

Layer	Piezometric level (m above mean sea level)	
	in 1940	in 1966
2	1.5	
4	1.0	-3.0
6	2.5	
11	2.0	-6.0
13	4.0	-4.5

An analysis by Lofgren and Klausing (1969) on nonconsolidated soil (like that of the Venice Lagoon) to a depth of 230 m yielded porosity values from 0.35 to 0.55, with values near 0.4 occurring most frequently. The average specific weight of solid grains in the same study varied from 2680 to 2730 kg/m^3. We assume an average value for the porosity ϕ of 0.4 and for the specific weight of soil grains, 2700 kg/m^3.

More difficult is the choice of average values for compressibility of the sand and clay, due to the wide range of variability of these parameters. Figure 34a provides the behavior of c_b versus σ_z for sand and Figure 34b gives the behavior for clay. Notice that the values of Figure 34a are lab values measured on samples that were allowed to expand laterally while in situ compaction occurs with lateral expansion precluded (oedometric conditions). Hence the values of Figure 34a must be multiplied by the factor:

$$\frac{1+\nu}{3(1-\nu)}$$

that is, 0.55, assuming ν (Poisson ratio) = 0.25.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

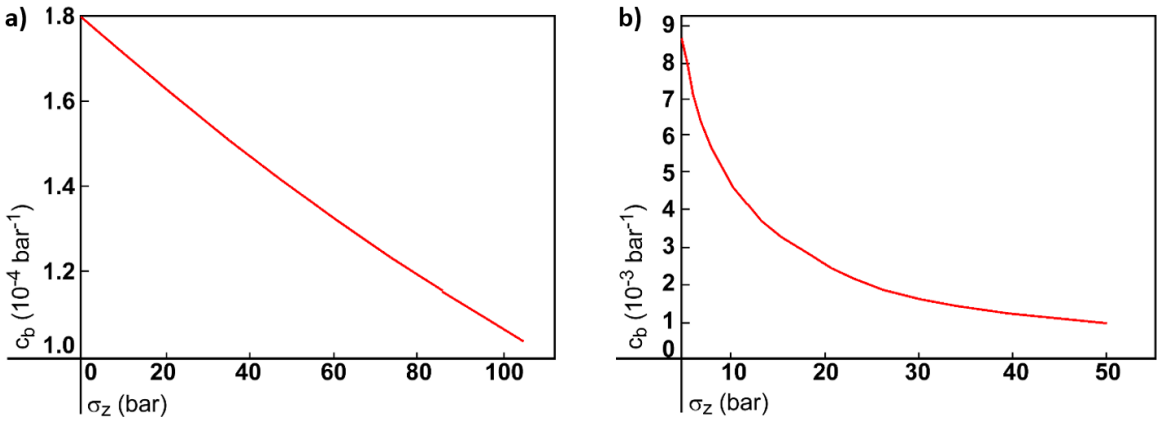


Figure 34 - Stress-dependent compressibility of a) sand and b) clay in the Venice coastland (modified after Gambolati (1972)).

The subsidence calculation is made for the period 1952-1969 where subsidence observations are available. Table 5 provides the initial stress σ_{z0} for each depth interval of Table 2 assuming full saturation throughout, and the compressibility derived from either Figure 34a for sand or Figure 34b for clay. Numerical values for the midplane of each stratum were used in the calculation.

Table 5 - Initial stress and compressibility for layers of the Venice lithostratigraphic sequence.

Layer	σ_{z0} (bar)	c_b (10^{-4} bar^{-1})
1	3.0	50.0
2	7.0	0.96
3	9.0	50.0
4	10.0	0.94
5	11.0	45.0
6	13.5	0.93
7	15.5	33.0
8	16.5	0.91
9	19.5	0.90
10	21.0	25.0
11	22.5	0.89
12	24.0	22.0
13	26.5	0.87
14	29.0	18.0

The data in Tables 3 and 4 are not sufficient to support an unequivocal deduction of the piezometric decline in the aquifers. However, one may note that the two deepest aquifers have had approximately equal decreases in piezometric level between 1940 and 1966, about twice the drop recorded in the layer at 100 m depth. Therefore, it is reasonable to postulate the existence of two distinct families of hydraulically disconnected aquifers separated by the clay layer at 210 m depth (layer 10 in Tables 2 and 5).

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

We have summarized our analysis and evaluation of the piezometric level data available in the representative data of Table 6. In some cases, the values differ from the observations of Tables 3 and 4, although they retain the order of magnitude involved and individually have only a slight influence on the final calculation of subsidence, which is substantially affected by the difference between the piezometric levels of successive periods. The difference in values used in the practical calculation are summarized in Table 7. Between 1900 and 1944, from 1944 to 1966, and between 1966 and beyond, we assume a linear time dependence of the piezometric level.

Table 6 - Derived data for the decline of the piezometric levels in the Venice aquifer.

Layer (aquifer only)	Piezometric level (m above mean sea level)		
	1900	1944	1966
2	3.0	1.5	-3.0
4	5.0	1.5	-3.0
6	5.0	1.5	-3.0
8	5.0	1.5	-3.0
11	5.0	3.0	-5.0
13	5.0	3.0	-5.0

Table 7 - Computation of the subsoil compaction and total land subsidence in the Tronchetto area of Venice.

Layer	c_v (m^2/year)	Piezometric level change 1952-1969 (m)	Compaction 1952-1969 (cm)
1			3.95
2		-3.5	0.10
3	0.45		1.20
4		-3.5	0.03
5			0.90
6		-3.5	0.10
7	0.45		0.75
8		-3.5	0.03
9			0.07
10	0.45		0.87
11		-6.4	0.08
12	0.45		1.10
13		-6.4	0.13
14			0.28
Total subsidence 1952-1969 (cm):			**9.60**

Finally, to make use of these data, we must have a value of the coefficient of consolidation c_v of clay. Referring again to the experience by Lofgren and Klausing (1969),

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

we adopt the value c_v = 0.45 m²/year found for clay at depth. For the upper layer we ignore the existence of delay, and we extend this assumption to the strata with thin alternations of sand and clay, because of the small thickness of the clay layers.

We have calculated, for each sand and clay stratum, the compaction from 1952 through 1969, with data from Tables 2, 5, and 6. For clay layers 3, 7, 10, and 12 it was necessary to calculate, with the data of Table 7, the compaction that occurred between 1900 and 1952 and between 1900 and 1969. This was done using Figure 17, by distributing the reduction in piezometric level proportionally over the periods 1900-10, 1910-20, 1920-30, 1930-40, 1940-44, 1944-52, 1952-60, 1960-69. It was assumed that the piezometric decline over each period occurred instantaneously at the period beginning with the superposition of the effects of all the instantaneous declines. It was also assumed that the effect of the extraction did not propagate below 290 m, the depth of the deepest well in the Venice Lagoon area. The results of our calculations are shown in Table 7. The computed subsidence amounts to 9.6 cm and compares quite satisfactorily with the value of 12 cm measured in Venice over the 1952-1969 period.

7 Conclusions

Anthropogenic land subsidence as related to subsurface fluid production has been known for almost a century. Groundwater withdrawal is the primary cause worldwide. Although overall damage today is estimated at billions of dollars a year (for example, Borchers and Carpenter, 2014), it is expected to increase due to population and economy growth. Land subsidence is still a problem that is under-evaluated by both governments and public opinion, especially in developing countries. Impacts include the loss of conveyance capacity in canals, streams and rivers, diminished effectiveness of levees, damage to roads, bridges, buildings, water wells, pipelines and other surface structures and infrastructures, increasing vulnerability of aquifers to saltwater intrusion, contamination of shallow aquifers through ground ruptures, and the flooding of coastal and inland urban areas (for example, New Orleans, Louisiana, USA and Mexico City, Mexico). The environmental impact of land subsidence has shifted over the last decade from rural and industrial sites (for example, the Antelope Valley, California, USA, or the Po River delta, Italy) to urban centers (for example, Shanghai, China and Mexico City, Mexico) because of increasing population and growth of mega-cities. Whereas in 1950, New York was the only urban area totaling more than 10 million people, presently more than 30 cities in the world exceed this impressively large number, most of them located on the coasts of developing countries.

When estimating the impacts of land subsidence over horizontal multi-aquifers, an initial approach uses 1-D vertical movement with ground settlement $\eta = \Delta p\, c_b\, s_0$ (that is, equal to the compaction η of the pumped unit with initial thickness s_0 and uniaxial vertical compressibility c_b subject to the pore pressure decline (Δp). If the fraction of clayey/silty soils (namely aquitards/confining beds and intersperse clayey/silty lenses) is important,

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

compaction, hence land subsidence, can be delayed in time relative to the compaction of the pumped sandy formations. As a major consequence land subsidence can still continue after well pumping ceases. Rebound due to aquifer recharge and aquitard re-pressurization (either natural or artificial) can make up for only a small fraction of the overall land subsidence as c_b in expansion is generally significantly smaller than virgin c_b in compression, and especially so in clayey/silty units.

The mechanisms underlying the basic process are well understood and universally accepted, and the mathematical modeling of past events and expected future cases is also well established. Modern computer technology allows for the simulation of complex geology and geometry in subsiding basins, of arbitrarily distributed pumping rates, of heterogeneity, anisotropy and non-linearity of the porous media properties, with a degree of accuracy inconceivable until only a few years ago. Measuring and monitoring anthropogenic land subsidence is presently at a very advanced stage, especially with the aid of satellite technology. Scientists can help support decision makers toward predicting, preventing or at least mitigating land subsidence successfully, although certain specific areas may still require more in-depth investigation. These include the 3-D deformation and stress fields correlating to groundwater pumping, uplift caused by water injection, and inverse modeling calibration. Land subsidence rates have been drastically reduced in several places around the world, for example, in Venice, Italy; Tokyo, Japan; and more recently Shanghai, China by exploiting water resources other than groundwater. However, for the majority of other mega-cities this target is not within easy reach. This is why land subsidence was recently mentioned as one of the most urgent threats to sustainable development, in the latest UNESCO International Hydrological Programme VIII (2014-2020).

Major research advancements are needed to better predict earth fissuring, hydraulic fracturing, fault activation, and induced seismicity. Modeling these processes require approaches developed in the field of discontinuous mechanics, approaches only partially assimilated in geosciences so far. Significant progress has been made in understanding theoretical mechanisms. However, monitoring their occurrence, characterizing their rheological properties, and developing reliable, robust, and accurate numerical models still pose major challenges for research efforts in the near future.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

8 Exercises

Exercise 1

Compute the total stress, vertical effective stress, and water pore pressure at a depth of 15 m below the bottom of a 6 m deep lake. The soil below the lake bottom consists of soft clay with a thickness of more than 15 m (Figure Exercise 1-1). The clay porosity is 40 percent and the specific weight of soil is 2700 kg/m^3. How will the effective stress change if the water level in the lake drops to 4 m?

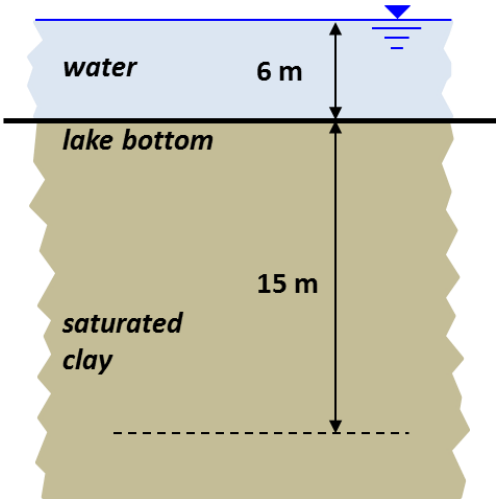


Figure Exercise 1-1 - Sketch of exercise 1.

Click here for solution to exercise 1

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Exercise 2

The aquifer system shown in Figure Exercise 2-1 undergoes groundwater pumping. The decline of the water table and piezometric head are recorded after 1 month and shown in the figure. The following information is available:

- aquitard: soil compressibility $c_b = 10^{-3}$ bar^{-1};
- phreatic aquifer: porosity 35 percent, moisture content 10 percent, $c_b = 10^{-4}$ bar^{-1}; and,
- confined aquifer: $c_b = 2\times10^{-5}$ bar^{-1};

Compute the cumulative land subsidence after 1 month and after 10 years assuming that the pressure decrease within the aquifers remains constant and that the aquitard hydraulic conductivity is three orders of magnitude smaller than that of the aquifers.

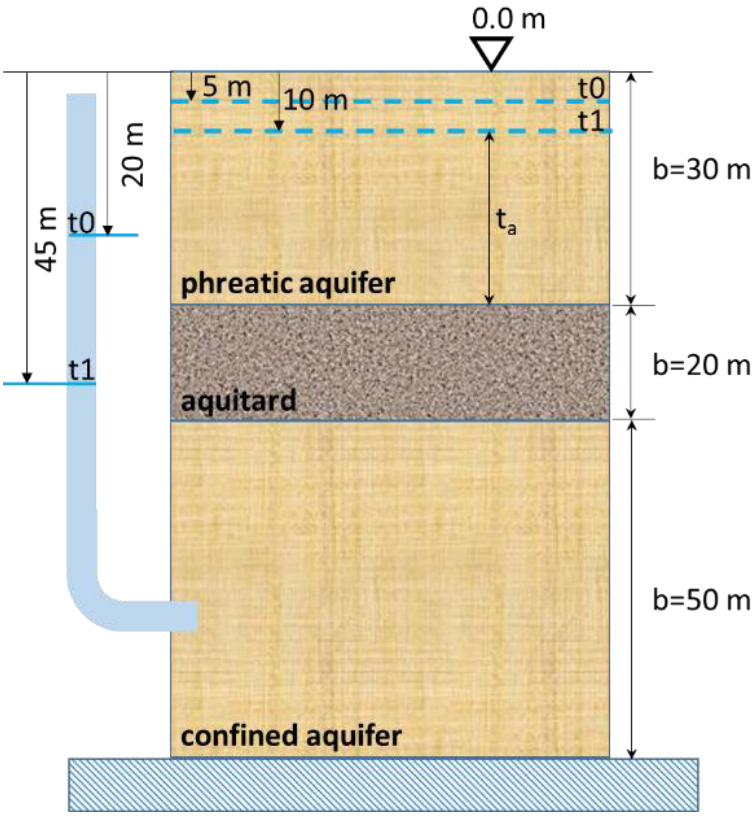


Figure Exercise 2-1 - Sketch of exercise 2.

Click here for solution to exercise 2

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Exercise 3

Groundwater is pumped from the two confined aquifers shown in Figure Exercise 3-1. After 1 year, a cumulative land subsidence equal to 0.1 m is measured at the land surface. The piezometric drawdown recorded at the same time in aquifer 1 and aquifer 2 amounts to 20 m and 15 m, respectively. Assuming a steady state pressure in the intervening aquitard, and the following ratios between the layer compressibility $c_{b,aquifer1} = 2\ c_{b,aquifer2}$ and $c_{b,aquifer1} = 0.1\ c_{b,aquitard}$, compute the compressibility of the three soil layers.

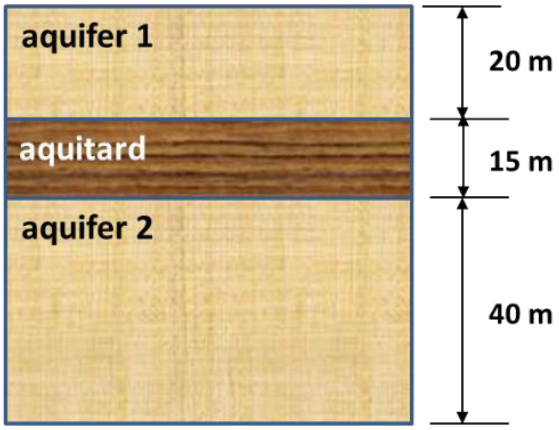


Figure 3-1 - Sketch of exercise 3.

Click here for solution to exercise 3

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

9 References

Allen, S.A., 1984, Types of land subsidence. *in*, Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Ground-Water Withdrawal, editor, J.F. Poland. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Paris, France, pages 291–305.

Allis, R., C. Bromley, and S. Currie, 2009, Update on subsidence at the Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zealand. Geothermics, volume 38, pages 169–180.

Amelung, F., D. Galloway, J.W. Bell, H.A. Zebker, and R.J. Laczniak, 1999, Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer system deformation. Geology, volume 27, pages 483–486.

Aobpaet, A., M.C. Cuenca, A. Hooper, and I. Trisirisatayawong, 2013, InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand. International Journal of Remote Sensing, volume 34, number 8, pages 2969–2982.

Baisch, S., R. Vörös, E. Rother, H. Stang, R. Jung, and R. Schellschmidt, 2010, A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forêts. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, volume 47, pages 405–413.

Bankher, K.A., and A.A. Al-Harthia, 1999, Earth fissuring and land subsidence in Western Saudi Arabia. Natural Hazards, volume 20, pages 21–42.

Baú, D., M. Ferronato, G. Gambolati, and P. Teatini, 2002, Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique. Géotechnique, volume 52, number 8, pages 605–616.

Bear, J., 1972, Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York.

Bell, J.W., F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi, and F. Novali, 2008, Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer system response to groundwater pumping and artificial recharge. Water Resources Research, volume 44, W02407, doi:10.1029/2007WR006152↗.

Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, 2002, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 40, number 11, pages 2375–2383.

Biot, M.A., 1941, A general theory of three-dimensional consolidation. Journal of Applied Physics, volume 12, number 2, pages 155–164.

Biot, M.A., 1955, Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. Journal of Applied Physics, volume 26, number 2, pages 182–185.

Borchers, J.W., and M. Carpenter, 2014, Land subsidence from groundwater use in California, Full Report of Findings. California Water Foundation, 151 pages.

Buckley, S.M., P.A. Rosen, S. Hensley, and B.D. Tapley, 2003, Land subsidence in Houston, Texas, measured by radar interferometry and constrained by extensometers. Journal of Geophysical Research, volume 108, number B11, page 2542, doi:10.1029/2002JB001848↗.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Budhu, M., 2008, Mechanisms of earth fissures using the Mohr-Coulomb failure criterion. Environmental Engineering and Geoscience, volume 14, number 4, pages 281–295.

Cabral-Cano, E., T.H. Dixon, F. Miralles-Wilhelm, O. Díaz-Molina, O. Sánchez-Zamora, and R.E. Carande, 2008, Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. Geological Society of America Bulletin, volume 120, number 11-12, pages 1556-1566.

Carpenter, M.C., 1993, Earth-fissure movements associated with fluctuations in ground-water levels near the Picacho Mountains, south-central Arizona, 1980-84. United States Geological Survey, Professional Paper, series 497, chapter H, 49 pages.

Carréon-Freyre, D., M. Cerca, R. Gutierrez-Calderon, and M.H.L. de Guevara, 2010, Monitoring of land subsidence and fracturing in Iztapalapa, Mexico City, *in*, Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development, editors, D. Carréon-Freyre, M. Cerca, and D.L. Galloway. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Publication, volume 339, Wallingford, United Kingdom, pages 44–50.

Carreon-Freyre, D., M. Cerca, G. Ochoa-Gonzalez, P. Teatini, and F.R. Zuñiga, 2016, Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence and hydraulic gradient in the Valley of Queretaro, Mexico. Hydrogeology Journal, volume 24, number 3, pages 657-674.

Castelletto, N., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti, and P. Teatini, 2008, Can Venice be raised by pumping water underground? A pilot project to help decide. Water Resources Research, volume 44, W01408, doi:10.1029/2007WR006177↗.

Chaussard, E., S. Wdowinski, E. Cabral-Cano, and F. Amelung, 2014, Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. Remote Sensing of the Environment, volume 140, pages 94-106.

Chen, C.T., J.T. Hu, C.Y. Lu, J.C. Lee, and Y.C. Chan, 2007, Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. Engineering Geology, volume 95, pages 30-47.

Chilingarian, G.V., and L. Knight, 1960, Relationship between pressure and moisture content of kaolinite, illite, and montmorillonite clays. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, volume 44, pages 101-106.

Cian, F., J.M.D. Blasco, and L. Carrera, 2019, Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: A methodology based on the integration of SNAP and StaMPS. Geosciences, volume 9, page 124; doi:10.3390/geosciences9030124↗.

Colazas, X.C., and R.W. Strehle, 1995, Subsidence in the Wilmington oil field, Long Beach, California, USA, *in*, Subsidence Due to Fluid Withdrawal, editors, G.V. Chilingarian, E.C. Donaldson, and T.F. Yen. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, pages 285-335.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Collins, P.M., 2007, Geomechanical effects on the SAGD process. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering, volume 10, number 4, pages 367–375.

Comerlati, A., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti, and P. Teatini, 2004, Saving Venice by sea water. Journal of Geophysical Research, Earth Surface, volume 109, F03006, doi:10.1029/2004JF000119↗.

Conway, B.D., 2014, Land subsidence monitoring. Arizona Department of Water Resources Technical Report 2, Phoenix, Arizona, 35 pages.

Cooper, H.H., Junior., 1966, The equation of groundwater flow in fixed and deforming coordinates. Journal of Geophysical Research, volume 71, number 20, pages 4785–4790.

Da Lio, C., P. Teatini, T. Strozzi, and L. Tosi, 2018, Understanding land subsidence in salt marshes of the Venice Lagoon from SAR Interferometry and ground-based investigations. Remote Sensing of the Environment, volume 205, pages 56-70.

Dang, V.K., C. Doubre, C. Weber, N. Gourmelen, and F. Masson, 2014, Recent land subsidence caused by the rapid urban development in the Hanoi region (Vietnam) using ALOS InSAR data. Natural Hazards and Earth System Science, volume 14, pages 657–674.

DeWiest, R.J.M., 1966, On the storage coefficient and the equations of groundwater flow. Journal of Geophysical Research, volume 71, number 4, pages 1117–1122.

Dong, S., S. Samsonov, H. Yin, and S. Ye., 2014, Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. Environmental Earth Sciences, volume 72, number 3, pages 677–691.

Du, J., S.J. Brissenden, P. McGillivray, S.J. Bourne, P. Hofstra, E.J. Davis, W.H. Roadarmel, S.L. Wolhart, S. Marsic, R.W. Gusek, C.A. Wright, 2008, Mapping reservoir volume changes during cyclic steam stimulation using tiltmeter-based surface deformation measurements. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering, volume 11, number 1, pages 63–72.

Ellsworth, W.L., 2013, Injection-induced earthquakes, Science, volume 341, pages 142–147.

Erban, L.E., S.M. Gorelick, and H.A. Zebker, 2014, Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. Environmental Research Letters, volume 9, 084010, doi:10.1088/1748-9326/9/8/084010↗.

Ezquerro, P., C. Guardiola-Albert, G. Herrera, J.A. Fernández-Merodo, M. Béjar-Pizarro, and R. Bonì, 2017, Groundwater and subsidence modeling combining geological and multi-satellite SAR data over the Alto Guadalentín aquifer (SE Spain). Geofluids, Article identification document 1359325, doi:10.1155/2017/1359325↗.

Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 39, number 1, pages 8–20.

Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, 2011, A new algorithm for processing interferometric data-stacks: Squee-SAR™. Institute of

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 49, number 9, pages 3460–3470.

Ferronato, M., G. Gambolati, C. Janna, and P. Teatini, 2008, Numerical modelling of regional faults in land subsidence prediction above gas/oil reservoirs. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, volume 32, pages 633–657.

Ferronato, M., N. Castelletto, G. Gambolati, C. Janna, and P. Teatini, 2013, II cycle compressibility from satellite measurements. Géotechnique, volume 63, number 6, pages 479–486.

Feth, J.H., 1951, Structural reconnaissance of the Red Rock Quadrangle, Arizona. United States Geological Survey Open File Report 51–199, 32 pages.

Finol, A., and Z.A. Sancevic, 1995, Subsidence in Venezuela, *in,* Subsidence Due to Fluid Withdrawal, editors, G.V. Chilingarian, E.C. Donaldson, and T.F. Yen. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, pages 337–372.

Freeze, R.A., 2000, Social decision making and land subsidence. *in,* Proceedings of sixth International Symposium on Land Subsidence, volume 1, editors, L. Carbognin, G. Gambolati, and A.I. Johnson. La Garangola Publication, Padova, Italy, pages 353–384.

Fuller, M., 1908, Summary of the controlling factors of Artesian flows, United States Geological Survey, Bulletin 319, 44 pages.

Gabriel, A.K., R.M. Goldstein, and H.A. Zebker, 1989, Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research, volume 94, number B7, pages 9183–9191.

Gabrysch, R.K., and R.J. Neighbors, 2000, Land-surface subsidence and its control in the Houston-Galveston region, *in* Proceedings of sixth International Symposium on Land Subsidence, volume 2, editors, L. Carbognin, G. Gambolati, and A. I. Johnson. La Garangola Publication, Padova, Italy, pages 91–92.

Galloway, D., and F.S. Riley, 1999, San Joaquin Valley, California: Largest human alteration of the Earth's surface, *in*, Land Subsidence in the United States, United States Geological Survey, Circular 1182, editors, D. Galloway, D.R. Jones, and S.E. Ingebritsen. United States Geological Survey, Denver, Colorado, pages 23–34.

Galloway, D.L., and J. Hoffmann, 2007, The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. Hydrogeology Journal, volume 15, pages 133–154.

Galloway, D., D.R. Jones, and S.E. Ingebritsen, editors, 1999, Land subsidence in the United States. United States Geological Survey, Circular 1182, 177 pages.

Gambolati, G., 1972, Estimate of subsidence in Venice using a one-dimensional model of the subsoil. IBM Journal of Research and Development, volume 16, number 2, pages 130–137.

Gambolati, G., 1973a, Equation for one dimensional vertical flow of groundwater: 1. The rigorous theory. Water Resources Research, volume 9, number 4, pages 1022–1028.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Gambolati, G., 1973b, Equation for one dimensional vertical flow of groundwater: 2. Validity range of the diffusion equation. Water Resources Research, volume 9, number 5, pages 1385–1395.

Gambolati, G., 1974, Second order theory of flow in three dimensional deforming media. Water Resources Research, volume 10, number 6, pages 1217–1228.

Gambolati, G., and R. A. Freeze, 1973, Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 1. Theory. Water Resources Research, volume 9, number 3, pages 721–733.

Gambolati, G., P. Gatto, and R. A. Freeze, 1974, Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 2. Results. Water Resources Research, volume 10, number 3, pages 563–577.

Gambolati, G., P. Gatto, and G. Ricceri, 1984, Land subsidence due to gas/oil removal in layered anisotropic soils by a finite element model, *in,* Proceedings of the Third International Symposium on Land Subsidence, International Association of Hydrological Sciences Publication, volume 151, editors, A.I. Johnson, L. Carbognin, and L. Ubertini, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, United Kingdom, pages 29–41.

Gambolati, G., G. Ricceri, W. Bertoni, G. Brighenti, and E. Vuillermin, 1991, Mathematical simulation of the subsidence of Ravenna. Water Resources Research, volume 27, number 11, pages 2899–2918.

Gambolati, G., P. Teatini, L. Tomasi, and M. Gonella, 1999, Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to sea level rise and natural and anthropogenic land subsidence. Water Resources Research, volume 35, number 1, pages 163–184.

Gambolati, G., P. Teatini, D. Baú, and M. Ferronato, 2000, The importance of poro-elastic coupling in dynamically active aquifers of the Po river basin, Italy. Water Resources Research, volume 36, number 9, pages 2443–2459.

Gambolati, G., P. Teatini, and M. Ferronato, 2005, Anthropogenic land subsidence, *in*, Encyclopedia of Hydrological Sciences, editor, M. G. Anderson. John Wiley and Sons, Chichester, United Kingdom, volume four, chapter 158, pages 2444–2459.

Gambolati, G., and P. Teatini, 2014, Venice Shall Rise Again - Engineered Uplift of Venice Through Seawater Injection. Elsevier Insights, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 100 pages.

Gan, Q., and D. Elsworth, 2014, Thermal drawdown and late-stage seismic-slip fault-reactivation in enhanced geothermal reservoirs, Journal of Geophysical Research - Solid Earth, volume 119, pages 8936–8949.

Geerstma, J., 1973, Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs. Journal of Petroleum Technology, volume 25, pages 734–744.

Gebremichael, E., M. Sultan, R. Becker, M. El Bastawesy, O. Cherif, and M. Emil, 2018, Assessing land deformation and sea encroachment in the Nile Delta: A radar interferometric and inundation modeling approach, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, volume 123, pages 3208–3224.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Gloe, C.S., 1984, Case history number 9.1. Latrobe Valley, Victoria, Australia, *in*, Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Ground-Water Withdrawal, editor, J. F. Poland. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, pages 145–153.

González, P.J., K.F. Tiampo, M. Palano, F. Cannavó, and J. Fernández, 2012, The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading, Nature Geoscience, volume 5, pages 821–825.

Häring, M.O., U. Schanz, F. Ladner, and B.C. Dyer, 2008, Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system, Geothermics, volume 37, pages 469–495.

He, Z., B. Ma, J. Long, H. Zhang, K. Liang, and D. Jiang, 2017, Recent ground fissures in the Hetao basin, Inner Mongolia, China. Geomorphology, volume 295, pages 102–114.

Hermann, R.B., and S.K. Park, 1981, The Denver earthquake of 1967–1968. Bulletin of the Seismological Society of America, volume 71, pages 731–745.

Hermansen, H., H.A. Landa, J.E. Sylte, and L.K. Thomas, 2000, Experiences after 10 years of waterflooding the Ekofisk Field, Norway. Journal of Petroleum Science and Engineering, volume 26, pages 11–18.

Hernandez-Marin, M., and T.J. Burbey, 2010, Controls on initiation and propagation of pumping-induced earth fissures: Insights from numerical simulations. Hydrogeology Journal, volume 18, number 8, pages 1773–1785.

Hernandez-Marin, M., and T.J. Burbey, 2012, Fault-controlled deformation and stress from pumping-induced groundwater flow. Journal of Hydrology, volumes 428–429, pages 80–93.

Hertz, H., 1881, On the contact of elastic solids, Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, volume 92, pages 156–171.

Higgins, S.A., I. Overeem, M.S. Steckler, J.P.M. Syvitski, L. Seeber, and S.H. Akhter, 2014, InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh. Journal of Geophysical Research - Earth Surface, volume 119, pages 1768–1781, doi:10.1002/2014JF003117↗.

Hoffmann, J., H.A. Zebker, D.L. Galloway, and F. Amelung, 2001, Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. Water Resources Research, volume 37, number 6, pages 1551–1556.

Hoffmann, J., D.L. Galloway, and H.A. Zebker, 2003, Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. Water Resources Research, volume 37, number 2, 1031 pages, doi:10.1029/2001WR001252↗.

Holland, A., 2013, Earthquakes triggered by hydraulic fracturing in south-central Oklahoma. Bulletin of the Seismological Society of America, volume 103, pages 1784–1792.

Holzer, T.L., and S.N. Davis, 1976, Earth fissures associated with water-table declines. Geological Society of America Abstract Programs, volume 8, number 6, pages 923–924.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Holzer, T.L., S.N. Davis, and B.E. Lofgren, 1979, Faulting caused by groundwater extraction in southcentral Arizona. Journal of Geophysical Research, volume 84, number B2, pages 603–612.

Holzer, T.L., 1981, Preconsolidation stress of aquifer systems in areas of induced land subsidence. Water Resources Research, volume 17, number 3, pages 693–704.

Holzer, T.L., and D.L. Galloway, 2005, Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States, *in*, Humans as Geologic Agents, Reviews in Engineering Geology, volume 26, editor, J. Ehlen, W.C. Haneberg, and R.A. Larson. Geological Society of America, Boulder, Colorado, pages 87–99.

Holzer, T.L., and E.H. Pampeyan, 1981, Earth fissures and localized differential subsidence, Water Resources Research, volume 17, number 1, pages 223–227.

Horton, S., 2012, Disposal of hydrofracking waste fluid by injection into subsurface aquifers triggers earthquake swarm in central Arkansas with potential for damaging earthquake. Seismological Research Letters, volume 83, pages 250–260.

Huizar-Álvarez, R., L.M. Mitre-Salazar, S. Marín-Córdova, J. Trujillo-Candelaria, and J. Martínez-Reyes, 2011, Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: Implications for groundwater extraction and the neotectonic regime. Geofísica Internacional, volume 50, number 3, pages 255–270.

Hung, W-C., C. Hwang, J.C. Liou, Y.S. Lin, and H.L. Yang, 2012, Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan. Engineering Geology, volumes 147–148, number 6, pages 78–90.

Hwang, C., W.C. Hung, and C.H. Liu, 2008, Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan high speed rail operation. Natural Hazards, volume 47, pages 1–16.

Ikeda, H., S. Kunisue, D. Nohara, K. Ooba, and T. Kokubo, 2015, In-situ formation compaction monitoring in deep reservoirs by use of fiber optics, Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, volume 372, pages 393-394, doi:10.5194/piahs-372-393-2015↗.

Ikehara, M.E., S.P. Phillips, 1994, Determination of land subsidence related to groundwater level declines using global positioning system and leveling surveys in Antelope Valley, Los Angeles and Kern Counties, California. United States Geological Survey Water - Resources Investigations Report, series 94-4184.

Ikehara, M.E., S.K. Predmore, and D.J. Swope, 1997, Geodetic network to evaluate historical elevation changes and to monitor land subsidence in Lower Coachella Valley, California, 1996. United States Geological Survey Water-Resources Investigations Report, series 97-4237.

Ingerson, I.M., 1941, The hydrology of the of the Southern San Joaquin Valley, California, and its relation to important water supplies. Transaction AGU, volume 22, number 1, pages 20–45.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Jachens, R.C., and T.L. Holzer, 1979, Geophysical investigations of ground failure related to groundwater withdrawal - Picacho Basin, Arizona. Ground Water, volume 17, number 6, pages 574–585.

Jacob, C.E., 1940, On the flow of water in elastic artesian aquifer, Transaction AGU, volume 21, number 2, pages 574–586.

Jha, B., and R. Juanes, 2014, Coupled multiphase flow and poromechanics: A computational model of pore pressure effects on fault slip and earthquake triggering. Water Resources Research, volume 50, number 5, pages 3776–3808.

Kanamori, H., and D.L. Anderson, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bulletin of the Seismological Society of America, volume 65, pages 1073–1095.

Khan, A.S., D.S. Khan, and D.M. Kakar, 2013, Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan. Environmental Earth Science, volume 70, pages 2719–2727.

Kim, W.Y., 2013, Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. Journal of Geophysical Research - Solid Earth, volume 118, pages 3506-3518.

Leonards, G.A., 1962, Engineering properties of soils, in Foundation Engineering. editor, G. A. Leonards. McGraw-Hill, New York, pages 66–240.

Liu, J., Y. Wang, Y. Lu, J. Wei, and D. Kanungo, 2017, Application of distributed optical fiber sensing technique in monitoring the ground deformation. Journal of Sensors, article number 6310197, doi:10.1155/2017/6310197↗.

Lofgren, B.E., and R.L. Klausing, 1969, Land subsidence due to groundwater withdrawal-Tulare Wasco area, California. United States Geological Survey paper 437-B.

Lofgren, B.E., 1971, Significant role of seepage stresses in compressible aquifer systems, EoS Transaction AGU, volume 52, number 11, page 832.

Lohaman, S.W., 1961, Compression of elastic artesian aquifers, United States Geological Survey Professional Paper, series 424-B, pages B47–B49.

Mahmoudpour, M., M. Khamehchiyan, M.R. Nikudel, and M.R. Ghassemi, 2013, Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran. Geopersia, volume 3, number 2, pages 49–62.

Maltman, A., editor, 1994, The Geological Deformation of Sediments. Springer Science and Business Media, Dordrecht.

Mazzoldi, A., A.P. Rinaldi, A. Borgia, and J. Rutqvist, 2012, Induced seismicity within geological carbon sequestration projects: Maximum earthquake magnitude and leakage potential from undetected faults. International Journal of Greenhouse Gas Control, volume 10, pages 434-442.

Meinzer, O.E., and H.A. Hard, 1925, The artesian-water supply of the Dakota Sandstone in the North Dakota with special reference to the Edgeley quadrangle. United States Geological Survey Water-Supply Paper, series 520-E, pages 73–95.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Meinzer, O.E., 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifers. Economic Geology, volume 23, number 3, pages 263–291.

Miller, M.M., and M. Shirzaei, 2015, Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift in Phoenix using InSAR time series and wavelet transforms. Journal of Geophysical Research - Solid Earth, volume 120, pages 5822-5842, doi:10.1002/2015JB012017↗.

Ng, A.H.M., L. Ge, X. Li, H.Z. Abidin, H. Andreas, and K. Zhang, 2012, Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, volume 18, pages 232–242.

Ortiz-Zamora, D., and A. Ortega-Guerrero, 2010, Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. Water Resources Research, volume 46, W01513, doi:10.1029/2008WR007398↗.

Pacheco, J., J. Arzate, E. Rojas, M. Arroyo, V. Yutsis, and G. Ochoa, 2006, Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. Engineering Geology, volume 86, pages 143–160.

Paris, A., P. Teatini, S. Venturini, G. Gambolati, and A.G. Bernstein, 2010, Hydrological effects of bounding the Venice (Italy) industrial harbour by a protection cut-off wall: A modeling study. Journal of Hydrologic Engineering, volume 15, number 11, pages 882-891.

Pepe, A., and F. Calò, 2017, A review of interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. Applied Sciences, volume 7, page 1264, doi:10.3390/app7121264↗.

Phien-wej, N., P.H. Giao, and P. Nutalaya, 2006, Land subsidence in Bangkok, Thailand. Engineering Geology, volume 82, pages 187–201.

Pierce, R.L., 1970, Reducing land subsidence in the Wilmington Oil field by use of saline waters. Water Resources Research, volume 6, number 5, pages 1505–1514.

Poland, J.F., and G.H. Davis, 1969, Land subsidence due to withdrawal of fluids, *in*, Reviews in Engineering Geology, volume 2, editor, D.J. Varnes, and G. Kiersch. Geological Society of America, Boulder, Colorado, pages 187–269.

Poland, J.F., editor, 1984, Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, 305 pages.

Poland, J.F., and B.E. Lofgren, 1984, San Joaquin valley, California, U.S.A., *in* Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal, editor, J. F. Poland. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, pages 263–277.

Pratt, W.E., and D.W. Johnson, 1926, Local subsidence of the Goose Creek oil field, Journal of Geology, volume 34, number 7, Part 1, pages 577–590.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Qu, F., Q. Zhang, Z. Lu, C. Zhao, C. Yang, and J. Zhang, 2014, Land subsidence and ground fissures in Xian, China 2005–2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis. Remote Sensing of the Environment, volume 155, pages 366–376.

Raffensperger, J.P., and R.E. Ferrell Jr., 1991, An empirical model of intrinsic permeability in reactive clay-bearing sands. Water Resources Research, volume 27, number 11, pages 2835-2844.

Rappleye, H.S., 1933, Recent areal subsidence found in releveling. Engineering News-Record, volume 110, page 848.

Raspini, F., C. Loupasakis, D. Rozos, and S. Moretti, 2013, Advanced interpretation of land subsidence by validating multi-interferometric SAR data: The case study of the Anthemountas basin (Northern Greece). Natural Hazards and Earth System Science, volume 13, pages 2425–2440.

Riley, F.S., 1986, Developments in borehole extensometry, *in,* Proceedings of the 3rd International Symposium on Land Subsidence. International Association of Hydrological Sciences Publication, volume 151, editors, Arnold Ivan Johnson, Laura Carbognin, and Lucio Ubertini. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, United Kingdom, pages 169–186.

Rintoul, W., 1981, The case of disappearing land, *in,* Drilling Ahead: Tapping California's Richest Oil Field, Valley Publishers, Santa Cruz, California, pages 116–137.

Rivera, A., E. Ledoux, and G. de Marsily, 1991, Nonlinear modeling of groundwater flow and total subsidence of the Mexico City aquifer-aquitard system, *in,* Proceedings of 4th International Symposium on Land Subsidence, International Association of Hydrological Sciences Publication, volume 200, editor, A. I. Johnson. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, United Kingdom, pages 44–58.

Schenato, L., 2017, A review of distributed fibre optic sensors for geo-hydrological applications. Applied Sciences, volume 7, page 896; doi:10.3390/app7090896↗.

Schenato, L., L. Palmieri, M. Camporese, S. Bersan, S. Cola, A. Pasuto, A. Galtarossa, P. Salandin, and P. Simonini, 2017, Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. Scientific Reports, volume 7, article number 14686, doi:10.1038/s41598-017-12610-1↗.

Schmidt, D.A., and R. Burgmann, 2003, Time dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara Valley, California, from a large InSAR data set. Journal of Geophysical Research - Solid Earth, volume 108, number B9, page 2416, doi:10.1029/2002JB002267↗.

Schultz, R., R. Wang, Y.J. Gu, K. Haug, and G. Atkinson, 2017, A seismological overview of the induced earthquakes in the Duvernay play near Fox Creek, Alberta. Journal of Geophysical Research - Solid Earth, volume 122, pages 492–505.

Segall, P., and S.D. Fitzgerald, 1996, A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs. Tectonophysics, volume 289, pages 117–128.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Shau, P., and P.K. Sikdar, 2011, Threat of land subsidence in and around Kolkata City and East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. Journal of Earth System Science, volume 120, number 3, pages 435–446.

Sheng, Z., and D.C. Helm, 1998, Multiple steps of earth fissuring caused by ground-water withdrawal, *in*, Current Research and Case Studies: Proceedings of the Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence, editor, J. Borchers. Star Publishing Company, Belmont, California, pages 229–238.

Sheng, Z., D.C. Helm, and J. Li, 2003, Mechanisms of earth fissuring caused by groundwater withdrawal. Environmental Engineering and Geoscience, volume 9, number 4, pages 313-324.

Shi, X., Y. Xue, S. Ye, J. Wu, Y. Zhang, and J. Yu, 2007, Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China. Environmental Geology, volume 52, number 1, pages 27–40.

Sreng, S.L., H. Sugiyama, T. Kusaka, and M. Saitoh, 2011, Upheaval phenomenon in clay ground induced by rising groundwater level. Poromechanics, DEStech Publications, Lancaster, Pennsylvania, volume 4, pages 196–203.

Stancliffe, R.P.W., and M.W.A. van der Kooij, 2001, The use of satellite-based radar interferometry to monitor production activity at the Cold Lake heavy oil field, Alberta, Canada. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, volume 85, number 5, pages 781–793.

Taylor, D.W., 1948, Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley, New York, 700 pages.

Teatini, P., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, E. Cairo, D. Marzorati, D. Colombo, A. Ferretti, A. Bagliani, F. Bottazzi, 2011a, Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy. Journal of Geophysical Research – Earth Surface, volume 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793↗.

Teatini, P., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, and L. Tosi, 2011c, A new hydrogeological model to predict anthropogenic Venice uplift. Water Resources Research, volume 47, W12507, doi:10.1029/2011WR010900↗.

Teatini, P., N. Castelletto, and G. Gambolati, 2014, 3D geomechanical modelling for CO_2 geological storage: A case study in an offshore northern Adriatic reservoir, Italy. International Journal of Greenhouse Gas Control, volume 22, pages 63–76.

Teatini, P., M. Ferronato, G. Gambolati, and M. Gonella, 2006, Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. Water Resources Research, volume 42, W01406, doi:10.1029/2005WR004242↗.

Teatini, P., G. Gambolati, M. Ferronato, T. Settari, and D. Walters, 2011b, Land uplift due to fluid injection. Journal of Geodynamics, volume 51, pages 1–16.

Teatini, P., L. Tosi, and T. Strozzi, 2012, Comment on "Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar" by Y.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Bock, S. Wdowinski, A. Ferretti, F. Novali, and A. Fumagalli. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, volume 13, Q07008, doi:10.1029/2012GC004191↗.

Teatini, P., L. Tosi, T. Strozzi, L. Carbognin, U. Wegmüller, and F. Rizzetto, 2005, Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. Remote Sensing of the Environment, volume 98, number 4, pages 403-413.

Terzaghi, K., 1923, Die berechnung der durchlassigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hidrodynamichen span-nungserscheinungen akademie der wissenschaften in wien. Mathematish-Naturwissen-Schaftiliche Klasse, volume 132, pages 125-138.

Terzaghi, K., and R.B. Peck, 1948, Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley, New York, 566 pages.

Teufel, L.W., D.W. Rhett, and H.E. Farrell, 1991, Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the Ekofisk field, North Sea, *in,* the thirty--second United States Symposium on Rock Mechanics, editor, J.C. Roegiers. American Rock Mechanics Association paper 91-063.

The Royal Society and the Royal Academy of Engineering, 2012, Shale Gas Extraction in the UK: A Review of Hydraulic Fracturing. London, United Kingdom, https://www.raeng.org.uk/publications/reports/shale-gas-extraction-in-the-uk↗.

Theis, C.V., 1935, The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Transaction American Geophysical Union, volume 16, pages 519–524.

Thu, T.M., and D.G. Fredlund, 2000, Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. Canadian Geotechnical Journal, volume 37, pages 621–637.

Todd, D.K., 1960, Groundwater Hydrology. second edition, John Wiley, New York, 552 pages.

Tokunaga, T., 2008, Groundwater potential in the central district of Tokyo, *in,* Groundwater Management in Asian Cities - Technology and Policy for Sustainability, editor, S. Takizawa. Springer, pages 61–78.

Tosi, L., P. Teatini, L. Carbognin, and J. Frankenfield, 2001, A new project to monitor land subsidence in the Northern Venice coastland (Italy). Environmental Geology, volume 52, pages 889-898.

Tosi, L., C. Da Lio, T. Strozzi, and P. Teatini, 2016, Combining L- and X-band SAR Interferometry to assess ground displacements in heterogeneous coastal environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy. Remote Sensing, volume 8, page 308, doi:10.3390/rs8040308↗.

USEPA, 2002, Technical program overview: Underground control regulations, United States Environmental Protection Agency Technical Report 816-R-02-025, Washington, District of Columbia, 81 pages.

van Thienen-Visser, K., and J.N. Breunese, 2015, Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments. The Leading Edge, June, pages 664–671, doi:10.1190/tle34060664.1↗.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Vasco, D.W., A. Rucci, A. Ferretti, A. Novali, R.C. Bissell, P.S. Ringrose, A.S. Mathieson, and I.W. Right, 2010, Satellite-based measurements of surface deformation reveal flow associated with the geological storage of carbon dioxide. Geophysical Research Letters, volume 37, L03303, doi:10.1029/2009GL041544↗.

Verruijt, A., 1969, Elastic storage of aquifers, *in*, Flow Through Porous Media, editor, R. De Wiest. Academic Press, New York, pages 331–376.

Ye, S., Y. Xue, J. Wu, and Q. Li, 2012, Modeling visco-elastic-plastic deformation of soil with modified Merchant model. Environmental Earth Sciences, volume 66, number 5, pages 1497-1504.

Ye, S., Y. Luo, J. Wu, X. Yan, H. Wang, X. Jiao, and P. Teatini, 2016, Three-dimensional modeling of land subsidence in Shanghai, China. Hydrogeology Journal, volume 24, number 3, pages 695-709.

Ye, S., A. Franceschini, Y. Zhang, C. Janna, X. Gong, J. Yu, and P. Teatini, 2018, A novel approach to model earth fissure caused by extensive aquifer exploitation and its application to the Wuxi case, China. Water Resources Research, volume 54, doi:10.1002/2017WR021872↗.

Yi, L., F. Zhang, H. Xu, S. Chen, W. Wang, and Q. Yu, 2011, Land subsidence in Tianjin, China. Environmental Earth Sciences, volume 62, pages 1151–1161.

Yu, J., Z. Li, and J. Wu, 2009, Land subsidence in the Changzhou-Wuxi region mapped by InSAR/GPS integration approach. Progress in Natural Science, volume 19, number 11, pages 1267–1271.

Yu, J., G. Wang, T.J. Kearns, and L. Yang, 2014, Is there deep-seated subsidence in the Houston-Galveston area? International Journal of Geophysics, volume 2014, number 11, doi:10.1155/2014/942834↗.

Wang, G.Y., G. You, and B. Shi, 2009, Earth fissures triggered by groundwater withdrawal and coupled by geological structures in Jiangsu Province, China. Environmental Geology, volume 57, number 5, pages 1047–1054.

Wegmüller, U., C. Werner, T. Strozzi, and A. Wiesmann, 2004, Multitemporal interferometric point target analysis, *in* Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, Series Remote Sensing, volume 3, editors, P. Smits and L. Bruzzone. World Science, Hoboken, New Jersey, pages 136–144.

Wu, J., X. Shi, S. Ye, Y. Xue, Y. Zhang, Z. Wei, and Z. Fang, 2010, Numerical simulation of viscoelastoplastic land subsidence due to groundwater overdrafting in Shanghai, China. Journal of Hydrologic Engineering, volume 15, number 3, pages 223–236.

Wu, J., H. Jiang, J. Su, B. Shi, Y. Jiang, and K. Gu, 2015, Application of distributed fiber optic sensing technique in land subsidence monitoring. Journal of Civil and Structure Health Monitoring, volume 5, pages 587–597.

Xue, Y., Y. Zhang, S. Ye, J. Wu, and Q. Li, 2005, Land subsidence in China. Environmental Geology, volume 48, number 6, pages 713–720.

Zaman, M.M., A. Abdulraheem, and J.C. Roegiers, 1995, Reservoir compaction and surface subsidence in the North Sea Ekofisk field, *in* Subsidence Due to Fluid

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Withdrawal, editors, E.C. Donaldson, G.V. Chilingarian, and T.F. Yen. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, pages 373–423.

Zanello, F., P. Teatini, M. Putti, and G. Gambolati, 2011, Long term peatland subsidence: Experimental study and modeling scenarios in the Venice coastland. Journal of Geophysical Research - Earth Surface, volume 116, F04002, doi:10.1029/2011JF002010↗.

Zhang, Y., H. Gong, Z. Gu, R. Wang, X. Li, and W. Zhao, 2014, Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China. Hydrogeology Journal, volume 22, number 2, pages 397–409.

Zhang, Y., J. Wu, Y. Xue, Z. Wang, Y. Yao, X. Yan, and H. Wang, 2015, Land subsidence and uplift due to long-term groundwater extraction and artificial recharge in Shanghai, China. Hydrogeology Journal, volume 23, pages 1851–1866.

Zhao, C., X. Ding, Q. Zhang, Z. Lu, and Z. Li, 2008, Monitoring of recent land subsidence and ground fissures in Xian with SAR interferometry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, volume 37, part B1, pages 147–150.

Zhu, L., H. Gong, X. Li, R. Wang, B. Chen, Z. Dai, and P. Teatini, 2015, Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. Engineering Geology, volume 193, number 2, pages 243-255, doi:10.1016/j.enggeo.2015.04.020↗.

Zhu, H.H., B. Shi, and C.C., Zhang, 2017, FBG-based monitoring of geohazards: current status and trends. Sensors, volume 17, page 452; doi:10.3390/s17030452↗.

Ziaie, A., K. Kumarci, A.R. Ghanizadeh, and A. Mahmodinejad, 2009, Prediction of earth fissures development in Sirjan. Research Journal of Environmental Science, volume 3, number 4, pages 486–496.

Zimmerman, R., 1991, Compressibility of sandstones. Developments in Petroleum Science, volume 29, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 183 pages.

Zoback, M.D., 2007, Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 452 pages.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

10 Boxes

Box 1 Justification of Terzaghi's Principle

To justify Equation 3, namely that $\Sigma A_i << 1$, we can provide the following rough calculation. Assume the solid grains are spherical with radius r. According to Hertz's theory (Hertz, 1881), the contact area A' of two spheres pressed by the force P reads:

$$A' = 1.23\pi\left(0.5\frac{Pr}{E_r}\right)^{2/3} \quad \text{(Box 1-1)}$$

with E_r the sphere Young modulus (which reflects the stiffness of a solid as the ratio of its tensile stress and axial strain, $ML^{-1}T^{-2}$). Let's take a representative porous medium depth (250 m) and spheres radius equal to, $r = 0.5$ mm, and assume full saturation. Considering the buoyant force exerted by water the weight P of a grain column of height h is:

$$P = \frac{h}{2r}\gamma'\frac{4}{3}\pi r^3 \quad \text{(Box 1-2)}$$

where:

γ' = specific weight of the spheres minus the upward buoyant force

Using Equation Box 1-2, A' above becomes Equation Box 1-3:

$$A' = 1.23\pi r^2\left(\frac{\pi h\gamma'}{3E_r}\right)^{2/3} \quad \text{(Box 1-3)}$$

Setting $h = 250$ m, γ' 1.7×10^4 N/m^3 (N is a Newton, the SI unit of force [MLT^{-2}], and 1 N is equal to 1 kg m s^{-2}) and $E_r = 1\times10^{11}$ N/m^2 (corresponding to a volumetric grain compressibility $c_{b,r} = 0.16\times10^{-10}$ m^2/N and a grain Poisson ratio $\nu_r = 0.25$, being:

$$c_{b,r} = 3\frac{1-2\nu_r}{E_r}$$

we obtain:

$$A' = 1.23\,\pi\,(0.5\text{ mm})^2\left(\frac{\pi}{3}\frac{250\text{ m}\;\;1.7x10^4\,\frac{\text{N}}{\text{m}^3}}{1x10^{11}\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2}}\right)^{2/3} \cong 0.00121\text{ mm}^2$$

that is, equal to 0.121 percent of the horizontal projection area of the spheres (equal to 1 mm^2). Hence the assumption that $\Sigma A_i << 1$ is fully warranted.

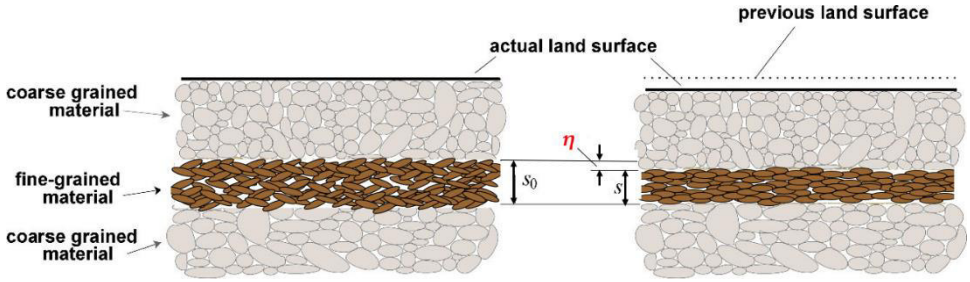
Return to where text linked to Box 1

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Box 2 Visualization of Relationship between Effective Stress and Void Ratio

To visualize the relationship between compaction and void ratio presented in Figure 2, which is repeated here for the readers convenience, it is useful to view abstract version of Figure 2. In the abstract version (Figure Box 2-1) in which all solids are grouped with no pore space, and all pore space occupies the remainder of the volume, with example values are assigned, as illustrated in Figure Box 2-1. The total compaction η of a layer as illustrated in Figure 2, with initial thickness s_0 and initial void ratio e_0 is completely due to reduced pore space as reflected by Equation 4 (repeated here for the readers convenience).

$$\eta = \Delta z \frac{\Delta e}{1 + e_0} \qquad \text{(repeat of Equation 4)}$$



Repeat of Figure 2 for the reader's convenience - Soil compaction η with a reduction of the porous space (grains are incompressible for all practical purposes).

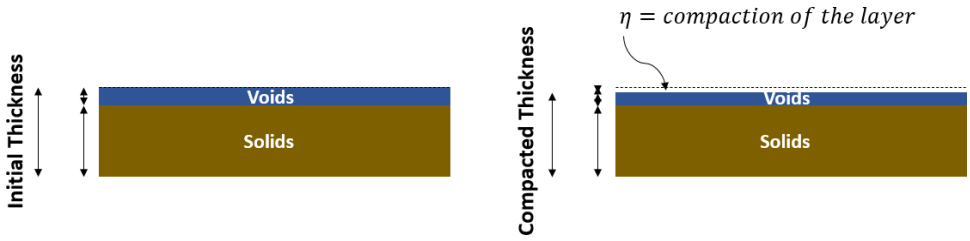


Figure Box 2-1 - Abstract representation of the fine-grained layer of Figure 2 in which all solids are grouped with no pore space, all pore space occupies the remainder of the volume.

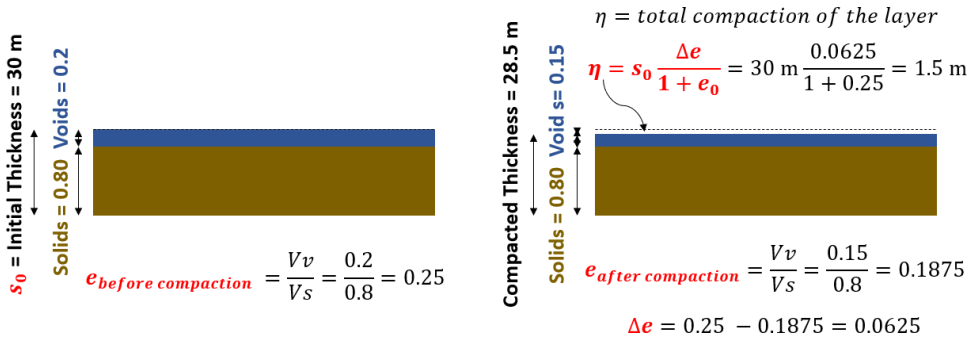
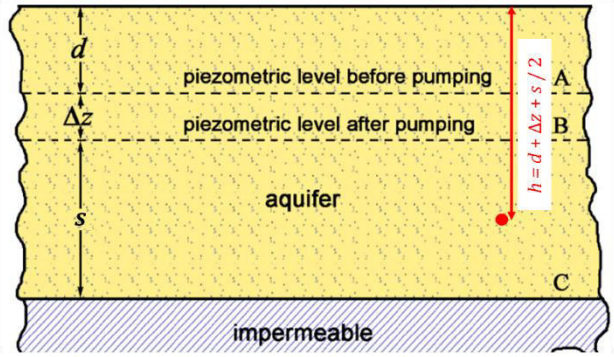


Figure Box 2-2 - Soil compaction η illustrated using the abstract example of the fine-grained material shown in Figure Box 2-1 with example values assigned to the pertinent parameters.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Calculation of the change in effective stress for a decline in the piezometric level from A to B at a point within an unconfined aquifer as shown in Figure 13, is illustrated in Figure Box 2-3 and Figure Box 2-4.



For piezometric level A the effective stress at ● is (Equation 9)

σ_{zA} = *weight of overlying solids* $(1\text{-}\phi)\,\gamma'(d+\Delta z+s/2)$

reduced by the bouyancy of the saturated overlying solids - $(1\text{-}\phi)\,\gamma(\Delta z+s/2)$

plus the weight of the moisture in the unsaturated zone + $\gamma\theta_w d$

When the piezometric level declines to B the effective stress at ● is

σ_{zB} = *weight of overlying solids* $(1\text{-}\phi)\,\gamma'(d+\Delta z+s/2)$

reduced by the bouyancy of the saturated overlying solids - $(1\text{-}\phi)\,\gamma(s/2)$

plus the weight of the moisture in the unsaturated zone + $\gamma\theta_w\,(d+\Delta z)$

Blue terms show the different thicknesses pertinent to calculating the effective stress for the different piezometric levels resulting in

$\Delta\sigma_{z(AtoB)} = \gamma\Delta z\,(1 - \phi + \theta_w)$ (Equation 8)

Figure Box 2-3 - Presentation of Equations 8 and 9 in words.

Assume the following values

d = 18 m $\quad \Delta z$ = 9 m $\quad s$ = 32 m

Φ = 0.2 $\quad \Theta$ = 0.04 $\quad \Upsilon'$ = 2650 kg/m^3 $\quad \Upsilon$ = 1000 kg/m^3

For piezometric level A the effective stress at ● is

σ_{zA} = *weight of overlying solids* $(1\text{-}0.2)\ 2650\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ (18\ \text{m} + 9\ \text{m} + \frac{32}{2}\ \text{m})$

reduced by the bouyancy of the saturated overlying solids - $(1\text{-}0.2)\ 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ (9\ \text{m} + \frac{32}{2}\ \text{m})$

plus the weight of the moisture in the unsaturated zone + $1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ 0.04\ (18\ \text{m})$

= $71{,}880\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

When the piezometric level declines to B the effective stress at ● is

σ_{zB} = *weight of overlying solids* $(1\text{-}0.2)\ 2650\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ (18\ \text{m} + 9\ \text{m} + \frac{32}{2}\ \text{m})$

reduced by the bouyancy of the saturated overlying solids - $(1\text{-}0.2)\ 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ (\frac{32}{2}\ \text{m})$

plus the weight of the moisture in the unsaturated zone + $1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ 0.04\ (18\ \text{m} + 9\ \text{m})$

= $79{,}440\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

$\sigma_{zB} - \sigma_{zA} = 7560\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

CHECK: $\Delta\sigma_{z(AtoB)} = 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ 9\ \text{m}\ (1 - 0.2 + 0.04\ ) = 7560\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

Figure Box 2-4 - Worked example of calculating effective stress.

Return to where text linked to Box 2.↑

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Box 3 3-D Poroelasticity Equations

Theoretically, land subsidence is best analyzed according to the theory of consolidation (Biot, 1941), which holds that consolidation itself represents the response of a compressible porous medium to changes in the flow field operating within it. A complete analysis of land subsidence requires determination of the 3-D deformation field accompanying the 3-D flow field, and must be accomplished in a complex multi-aquifer system. A few basic principles underlie the consolidation process. As outlined above, the first principle advanced by Terzaghi (1923) states that the total stress σ_{tot} at any point of the porous medium is equal to the sum of the effective intergranular σ_{eff} and the neutral pore pressure p:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{eff} + p$$

Deformation of the porous body is controlled exclusively by variation of the effective stress σ_{eff}. If we consider changes relative to an initial undisturbed state of equilibrium, the Cauchy equations of equilibrium are cast in terms of incremental effective stress and pore pressure as shown in Equation Box 3-1.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\
\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial y} \\
\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial z}
\end{aligned} \qquad \text{(Box 3-1)}$$

where:

σ_{xx} = incremental normal effective stress in x direction
σ_{yy} = incremental normal effective stress in y direction
σ_{zz} = incremental normal effective stress in z direction
and, the incremental shear stresses:
$\tau_{xy} = \tau_{yx}$
$\tau_{xz} = \tau_{zx}$
$\tau_{yz} = \tau_{zy}$

The relationships between the incremental effective stress tensor σ and the incremental strain tensor ε for a geomechanical isotropic medium are shown in Equation Box 3-2.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{bmatrix} \qquad \text{(Box 3-2)}$$

with matrix D^{-1} as shown in Equation Box 3-3.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$D^{-1} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(Box 3-3)}$$

where:

E = Young's modulus (stiffness of a solid as the ratio of its tensile stress and axial strain, $ML^{-1}T^{-2}$)

ν = Poisson's ratio (reflects deformation of a solid in the direction perpendicular to loading, the negative ratio of transverse strain to axial strain, dimensionless)

Typically, in layered aquifer systems laid down in a depositional environment, the geomechanical properties along the vertical direction (v) are different from those in a horizontal direction (h). The geomechanical properties of a transversally isotropic porous medium are fully described by five independent parameters E_v, E_h, ν_v, E_h, G_v, with G the shear modulus. G_h is dependent on E_h and ν_h through Equation Box 3-4.

$$G_h = \frac{E_h}{2(1-\nu_h)} \quad \text{(Box 3-4)}$$

Thermodynamic consistency requires the positive definiteness of matrix C^{-1} relating the stress tensor to the strain tensor, which implies (Ferronato et al., 2013):

$$1-\nu_h^2 > 0 \quad \text{and} \quad 1-\nu_h-2\nu_h^2\frac{E_v}{E_h} > 0$$

then, as shown in Equations Box 3-5, setting,

$$\begin{aligned} \vartheta &= \frac{E_h}{E_v} \\ \eta &= \frac{E_h}{2(1+\nu_h)G_v} \\ \alpha &= \frac{1}{E_v}\left(1-\frac{2\nu_v^2}{1-\nu_h}\frac{E_v}{E_h}\right) \end{aligned} \quad \text{(Box 3-5)}$$

the constitutive matrix C^{-1} (equivalent to D^{-1} for a transversally isotropic medium) is Equation Box 3-6 (Ferronato et al., 2013).

$$C^{-1} = \frac{1}{(1-\nu_h^2)\,\alpha}\begin{bmatrix} C_1^{-1} & 0 \\ 0 & C_2^{-1} \end{bmatrix} \quad \text{(Box 3-6)}$$

where:

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$C_1^{-1} = \begin{bmatrix} \vartheta - \nu_v^2 & \nu_v^2 + \vartheta\nu_h & \nu_v(1+\nu_h) \\ \nu_v^2 + \vartheta\nu_h & \vartheta - \nu_v^2 & \nu_v(1+\nu_h) \\ \nu_v(1+\nu_h) & \nu_v(1+\nu_h) & 1 - \nu_v^2 \end{bmatrix}$$

$$C_2^{-1} = \frac{\vartheta(1-\nu_h) - 2\nu_v^2}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\eta & 0 \\ 0 & 0 & 1/\eta \end{bmatrix}$$

The coefficient α provided in Equation Box 3-5 is the vertical oedometric compressibility of the medium prevented from expanding laterally (Gambolati et al., 1984). Setting $\nu_h = \nu_v$, $E_h = E_v$, and $G_h = G_v$, Equation Box 3-6 becomes Equation Box 3-2 and α becomes Equation Box 3-7.

$$\alpha = \frac{(1+\nu)\ (1-2\nu)}{(1-\nu)E} \qquad \text{(Box 3-7)}$$

Equation Box 3-7 is the vertical compressibility of an isotropic soil. If we replace the relations between the effective stress and the strain above into the Cauchy equations, we obtain the equilibrium equations for a porous medium subject to internal pore pressure variations, p, written in terms of displacements (isotropic medium) as in Equation Box 3-8.

$$\begin{aligned} G\nabla^2 u + (\lambda + G)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ G\nabla^2 v + (\lambda + G)\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial y} \\ G\nabla^2 w + (\lambda + G)\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \qquad \text{(Box 3-8)}$$

where:

u,v,w = components of the incremental position vector along the coordinate axes x, y, and z, respectively

∇^2 = Laplace operator

λ = Lamè constant equal to $\nu E/[(1-2\nu)\ (1+\nu)]$

ε = $\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$, volume strain or dilatation

Similar equations hold for a transversally isotropic medium, not given here, however, because of their greater complexity. There are three equations with four unknowns: u, v, w, and p. The additional equation needed to close the system is provided by the groundwater flow equation that controls subsurface flow within the aquifer.

The flow equation is based on the principle of mass conservation for both solid grains and water. Thus, Darcy's law must be cast in terms of the relative velocity of fluid to grains. Cooper (1966) and Gambolati (1973a) derived the flow equations by assuming a grain velocity different from zero, and worked with material derivatives (total derivatives and substantial derivatives) in the appropriate places in the development. Gambolati (1973b) showed that the grain velocity can be discarded, that is, assumed to be zero, as long as the final soil settlement does not exceed 5 percent of the original aquifer thickness, a condition reached in nearly all applications. DeWiest (1966) took into consideration the

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

dependence of the hydraulic conductivity on the water's specific weight, γ, via the intrinsic permeability and the dependence of γ on the incremental pressure variation. Gambolati (1973b) again showed that the influence of the dependence of γ on the hydraulic conductivity is slight, and can safely be neglected. Later, within this framework, the groundwater flow equation as originally developed by Biot (1941, 1955) was elegantly and clearly derived by Verruijt (1969), and thus the fourth equation to be added to the above Equation Box 3-8 is Equation Box 3-9.

$$\frac{1}{\gamma}\nabla \cdot \left(K_{ij}\nabla p\right) = \phi\beta\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \qquad \text{(Box 3-9)}$$

where:

∇ = $\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$

K_{ij} = $k_{ij}\gamma/\mu$, hydraulic conductivity tensor with principal components $K_{xx,}$ $K_{yy,}$ and K_{zz}

k_{ij} = intrinsic permeability tensor

μ = viscosity of water

ϕ = medium porosity

β = compressibility of water

Equation Box 3-8 together with Equation Box 3-9 form the mathematical basis of the so-called "coupled" (or Biot) formulation of flow and stress in an isotropic porous medium experiencing groundwater flow. It is the most sophisticated theoretical approach to the simulation of land subsidence in the area of linear elasticity. Gambolati (1974) showed that at any point *P* of the porous medium, the deformation may be expressed as the sum of two contributing factors: (1) the pointwise deformation caused by the incremental pore pressure acting at *P* and (2) the deformation caused by the pressure *p* acting outside *P*, namely in the remainder of the medium. Gambolati (1974) called the second factor the "three-dimensional effect": it vanishes, of course, in one-dimensional media. The first factor is expressed as:

$$\varepsilon = \frac{1}{E_v}\left(1 - \frac{2\nu_v^2}{1-\nu_h}\frac{E_v}{E_h}\right)p = \alpha p$$

in a geomechanical transversally isotropic medium, and

$$\varepsilon = \frac{(1+\nu)\ (1-2\nu)}{(1-\nu)E}p = \alpha p$$

in a geomechanical isotropic medium, with α the vertical compressibility previously defined. Replace the above expression for ε in the flow Equation Box 3-9) and you obtain the so-called "uncoupled" formulation of flow and stress. In the uncoupled formulation the flow equation is solved for *p* independently of the stress equation, with the gradient of the pore pressure variations later integrated into the equilibrium equations (Equation Box 3-8) as a known external source of strength. The uncoupled flow equation is thus Equation Box 3-10.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$\nabla \cdot \left(K_{ij} \nabla p\right) = \gamma(\alpha + \phi\beta) \frac{\partial p}{\partial t} \qquad \text{(Box 3-10)}$$

Assuming the medium to be transversally isotropic as far as the hydraulic conductivity is concerned as well, having axes coincident with the principal directions of anisotropy, Equation Box 3-10 becomes Equation Box 3-11.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx} \frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy} \frac{\partial p}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz} \frac{\partial p}{\partial z}\right) = S_s \frac{\partial p}{\partial t} \qquad \text{(Box 3-11)}$$

The coefficient $S_s = \gamma(\alpha + \phi\beta)$ is the specific elastic storage coefficient referred to previously. The uncoupled equation has been the basis of classical groundwater hydrology from the very beginning of quantitative hydrogeology's development (for example, Theis, 1935; Jacob, 1940; Todd, 1960; and Bear, 1972), and is still universally used today. The superiority of the coupled approach in predicting land subsidence due to groundwater pumping has been disputed by Gambolati et al. (2000), who showed that the uncoupled pressure solution can be safely used in predicting land subsidence in compacting sedimentary basins, the coupled and uncoupled solutions being virtually indistinguishable at any time of practical interest.

It may also be of interest to mention some basic definitions of oedometer vertical soil compressibility, which is the main rock parameter controlling land subsidence. The definition of α given above is the one derived from the classical theory of elasticity assuming reversible elastic properties of the porous medium. The problem of defining various rock compressibilities is thoroughly discussed by Zimmerman (1991). In the present analysis, we restrict our discussion to the comparison between α as defined above, and the compressibility c_b as is typically defined in geotechnics by Equation Box 3-4). Assume a 1-D soil sample with initial length Δz experiencing a vertical (oedometer) deformation $\delta(\Delta z)$. In the classical elastic theory, the vertical compressibility α is defined as Equation Box 3-12:

$$\alpha = \frac{\delta(\Delta z)}{\Delta z} \frac{1}{p} = \frac{\varepsilon}{p} \qquad \text{(Box 3-12)}$$

where p, equal and opposite to the incremental effective stress, is negative in the sample compaction $\delta(\Delta z)$. Using the void ratio, we can write Equation Box 3-13:

$$\delta(\Delta z) = [\Delta z + \delta(\Delta z)] \frac{e}{1+e} - \Delta z \frac{e_0}{1+e_0} \qquad \text{(Box 3-13)}$$

where:

e_0 = initial void ratio prior to compaction (Figure 2)

Equation Box 3-13 assumes that the individual soil grains are incompressible, so that the sample volume $\delta(\Delta z)$ is equal to the variation of the porous volume (Figure 2). By dividing both sides of Equation Box 3-13 by Δz and rearranging, we obtain Equation Box 3-14.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$\varepsilon = \frac{\delta(\Delta z)}{\Delta z} = \frac{e - e_0}{1 + e_0} \qquad \text{(Box 3-14)}$$

also,

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{p} = \frac{e - e_0}{p(1 + e_0)}$$

and if α does not depend on p then Equation Box 3-15 can be written.

$$\frac{de}{dp} = \alpha(1 + e_0) \qquad \text{(Box 3-15)}$$

That is, the void ratio is proportional to the incremental pressure p (for any given initial e_0). Substitution of Equation Box 3-15 into Equation 5 of the main portion of this book, with $dp = -d\,\sigma_z$, leads to:

$$c_b = \alpha \frac{1 + e_0}{1 + e} = \alpha \frac{1 + e_0}{1 + e_0 + \alpha p\ (1 + e_0)} = \frac{\alpha}{1 + \alpha p}$$

Only when the incremental pressure p approaches 0, do α and c_b coincide. In general, the two compressibilities α and c_b are not equal and cannot be considered simultaneously constant. The expression of c_b versus ε is (using Equation Box 3-14) is as shown in Equation Box 3-16.

$$c_b = \frac{1 + e_0}{1 + e} \frac{d\varepsilon}{dp} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dp} \qquad \text{(Box 3-16)}$$

If α is constant and $d\varepsilon/dp = \alpha$ we have Equation Box 3-17.

$$c_b = \frac{\alpha}{1 + \varepsilon} = \frac{\alpha}{1 + \alpha p} \qquad \text{(Box 3-17)}$$

Gambolati (1973b) has shown that the assumption of constant α can be easily removed to give the general correct relationship between α and c_b as in Equation Box 3-18.

$$c_b = \frac{p \frac{d\alpha}{dp} + \alpha}{1 + \alpha p} \qquad \text{(Box 3-18)}$$

If c_b is constant, Equation Box 3-18 can be integrated to provide α as expressed in Equation Box 3-19.

$$\alpha = \frac{\exp^{p\ c_b} - 1}{p} \qquad \text{(Box 3-19)}$$

The assumption that the individual grains are incompressible is fully warranted by the fact that the compressibility of any aquifer system is orders-of-magnitude greater than the compressibility of the single grain. Geerstma (1973) provides the value of $\alpha = 1.6 \times 10^{-6}$ bar^{-1} for grains of silicate. In contrast, the compressibility of aquifer systems is, typically, orders-of-magnitude larger than the compressibility of single grains as shown in Figure Box 3-1. Figure Box 3-1 provides an example of the compressibility of an aquifer system in terms of the relationship of α versus depth and vertical effective intergranular stress σ_{zz} in the sedimentary basin of the river Po plain, Italy (Gambolati et al., 1991, 1999;

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

and Comerlati et al., 2004). However, as long as the ultimate relative compaction αp does not exceed 5 percent of the compacting unit (which is typically the case in geologic formations, particularly in shallow formations), the difference between α and c_b does not exceed 2-3 percent (Gambolati, 1973b, Figure 14) and for practical applications the two definitions are interchangeable.

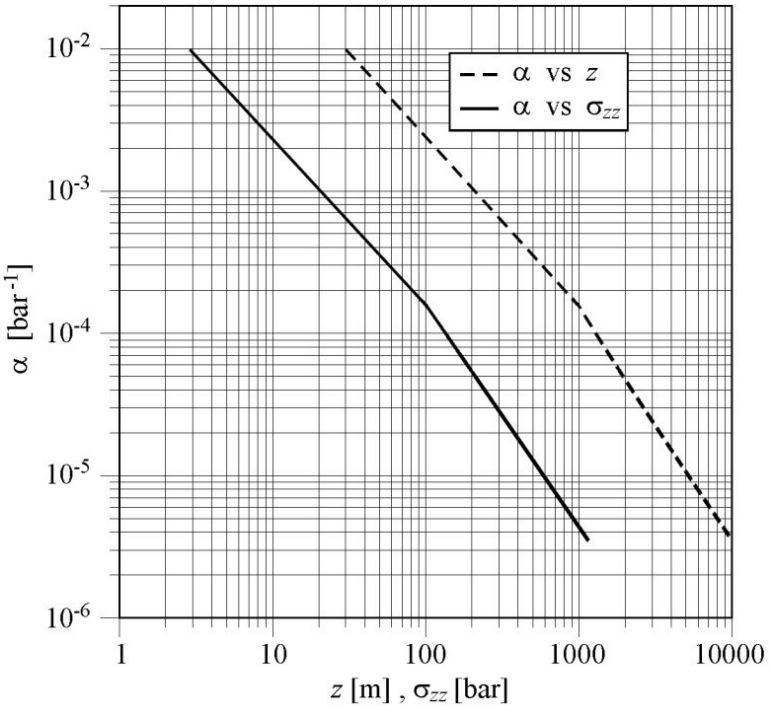


Figure Box 3-1 - Uniaxial vertical compressibility, α, versus effective stress σ_{zz} and depth z in the Po river plain, Italy (after Comerlati et al., 2004).

Finally, it is worth mentioning that, when comprehensive in situ and lab soil characterizations are available, more realistic constitutive formulations taking into account plastic or viscoplastic behavior may be developed and used for the simulation and prediction of land subsidence in soft under-consolidated alluvial basins (for example, Ye et al., 2012).

Return to where text linked to Box 3.1

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

11 Exercise Solutions

Exercise 1 Solution

Let's denote with $\gamma_w = 1000$ kg/m^3 the water specific weight and with $\gamma_{grain} = 2700$ kg/m^3 the specific weight of the solid. The specific weight of the saturated clay γ_s can be computed as follows:

$$\gamma_s = \phi\,\gamma_w + (1-\phi)\gamma_{\text{grain}}$$

$$\gamma_s = 0.4\,(1000) + (1-0.4)2700 = 2020\ \text{kg/m}^3$$

With a 6 m deep lake, pressure p at 15 m below the lake bottom amounts to

$$p = (6+15)\ \text{m}\ 1000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 21{,}000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Pressure is often reported in bars. There are 9.8067 x 10^{-5} bars per $1\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, so

$$p = 21{,}000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = \ 2.06\ \text{bars.}$$

The geostatic stress is:

$$\sigma_c = 6\ \text{m}\ 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 15\ \text{m}\ 2020\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 6000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 30{,}300\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 36{,}300\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_c = 3.56\ \text{bar}$$

Rearranging Terzaghi's principle (Equation 3), the effective vertical stress σ_z is equal to:

$$\sigma_z = \sigma_c - p = 3.56\ \text{bar} - 2.06\ \text{bar} = 1.50\ \text{bar}$$

If the water level drops to 4 m, both the pressure and the total vertical stress reduce the same amount ($2\ \text{m}\ 1000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\,\frac{9.8067\ \text{x}\ 10^{-5}\ \text{bars}}{1\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} = 0.2$ bar). Hence, σ_z does not vary.

Return to Exercise 1

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Exercise 2 Solution

Question 1: land subsidence after 1 month

Because of the small hydraulic conductivity, it can reasonably be assumed that pressure depletion has not yet significantly propagated into the aquitard. Therefore, similarly to Equation 13, the total subsidence η_{tot} is the sum of compaction of the phreatic aquifer and the confined aquifer only: $\eta_{tot} = \eta_p + \eta_c$.

The compaction of the phreatic aquifer amounts to $\eta_p \cong t_p\, c_{b,p}\, \Delta\sigma_{z,p}$ with t_p the time-averaged aquifer thickness below the water table (Equation 10). Denoting the porosity with ϕ and the water saturation with θ_w, the effective stress change is given by Equation 7.

$$\Delta\sigma_{z,p} = \gamma_w\, \Delta z_p\, (1 - \phi + \theta_w) = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\, 5\ \text{m}\ \ (1 - 0.35 + 0.10)$$

$$= 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\ 3.75\ \text{m} = 3750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \frac{9.8067 \times 10^{-5}\text{bar}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} = 0.37\ \text{bar}$$

Therefore:

$$\eta_p = t_p\, c_{b,p}\, \Delta\sigma_{z,p} = \frac{1}{2}(25 + 20)\ \text{m}\ \ \frac{1\times10^{-4}}{\text{bar}}\, 0.37\ \text{bar} = 0.00083\ \text{m} = 0.83\ \text{mm}.$$

The compaction of the confined aquifer amounts to:

$$\eta_c = b_c\, c_{b,c}\, \gamma_w \left(\Delta z_c - \Delta z_p(\phi - \theta_w)\right)$$

$$\eta_c = 50\ \text{m}\ \frac{2 \times 10^{-5}}{\text{bar}} \left(\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(25\ \text{m} - 5\ m\ (0.35 - 0.1)\right) \right) \frac{9.8067 \times 10^{-5}\text{bar}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \right)$$

$$\eta_c = 50\ \text{m}\ \frac{2 \times 10^{-5}}{\text{bar}} \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (23.75\ \text{m}) \frac{9.8067 \times 10^{-5}\text{bar}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \right)$$

$$\eta_c = 50\ \text{m}\ \frac{2 \times 10^{-5}}{\text{bar}}\ (2.33\ \text{bar}\ )$$

$$\eta_c = 0.00233\ \text{m} = 2.33\ \text{mm}$$

Hence: $\eta_{tot} = 0.83 + 2.33 = 3.16$ mm

Question 2: land subsidence after 10 years

In this case, aquitard compaction contributes to land subsidence $\eta_{tot} = \eta_p + \eta_{aqt} + \eta_c$. After a period of 10 years, it can be assumed that the pressure within the aquitard has reached an equilibrated distribution, with the ultimate aquitard compaction equal to (Equation 28):

$$\eta_{aqt} = \frac{1}{2}\left(\Delta\sigma_{z,p} + \Delta\sigma_{z,c}\right) t_{aqt} c_{b,aqt} = 0.5(0.37\ \text{bar} + 2.33\ \text{bar})\ 20\ \text{m} \frac{1 \times 10^{-3}}{\text{bar}} = 0.027\ \text{m}$$

$$= 27\text{mm}$$

The cumulative land subsidence is: $\eta_{tot} = 0.83 + 27.0 + 2.33 = 30.16$ mm.

Return to Exercise 2

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Exercise 3 Solution

The cumulative land subsidence is due to the compaction of the three layers (Equation 13):

$$\eta_{tot} = \eta_{aquifer1} + \eta_{aquitard} + \eta_{aquifer2}$$

The compaction of each aquifer can be obtained by means of Equation 12:

$$\eta_{aquifer1} = t_{aquifer1}\, c_{b,aquifer1}\, \Delta\sigma_{z,aquifer1}$$

$$\eta_{aquifer2} = t_{aquifer2}\, c_{b,aquifer2}\, \Delta\sigma_{z,aquifer2}$$

The ultimate aquitard compaction amounts to (Equation 28):

$$\eta_{aquitard} = t_{aquitard}\, c_{b,aquitard}\ 0.5\left(\Delta\sigma_{z,aquifer1} + \Delta\sigma_{z,aquifer2}\right)$$

The sum becomes:

$$\eta_{tot} = \left(t_{aquifer1}\, c_{b,aquifer1}\, \Delta\sigma_{z,aquifer1}\right) + \left(t_{aquitard}\, c_{b,aquitard}\, 0.5\left(\Delta\sigma_{z,aquifer1} + \Delta\sigma_{z,aquifer2}\right)\right) + \left(t_{aquifer2}\, c_{b,aquifer2}\, \Delta\sigma_{z,aquifer2}\right)$$

Taking into account the relationships between the compressibility of the three layers, $c_{b,aquifer1} = 2\, c_{b,aquifer2}$ and $c_{b,aquifer1} = 0.1\, c_{b,\,aquitard}$ we can write the expression in terms of the compressibility of aquifer 1:

$$\eta_{tot} = \left(t_{aquifer1}\, c_{b,aquifer1}\, \Delta\sigma_{z,aquifer1}\right) + \left(t_{aquitard}\ 10\, c_{b,aquifer1}\, 0.5\left(\Delta\sigma_{z,aquifer1} + \Delta\sigma_{z,aquifer2}\right)\right) + \left(t_{aquifer2}\ 0.5 c_{b,aquifer1}\, \Delta\sigma_{z,aquifer2}\right)$$

Substituting the known subsidence (0.1 m), the decreased pressure in aquifers 1 and 2 (20 m and 15 m, and converting those pressures from height of water to kg/m^3, so 20,000 kg/m^{3}and 15,000 kg/m^3), and their thicknesses (20 m and 40 m), as well as the 15 m aquitard thickness, results in:

$$0.1\ \text{m} = \left(20\ \text{m}\ c_{b,aquifer1} 20{,}000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right) + \left(15\ \text{m}\ 10\ c_{b,aquifer1}\ 0.5\left(20{,}000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 15{,}000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)\right) + \left(40\ \text{m}\ 0.5 c_{b,aquifer1}\ 15{,}000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)$$

There are 9.8067×10^{-5} bars per $1\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, so:

$$0.1\ \text{m} = \left(20\ \text{m}\ c_{b,aquifer1} 1.96\ \text{bar}\right) + \left(15\ \text{m}\ 10\ c_{b,aquifer1}\ 0.5\ (1.96\ \text{bar} + 1.47\ \text{bar})\right) + \left(40\ \text{m}\ 0.5 c_{b,aquifer1}\ 1.47\ \text{bar}\right)$$

carrying out the multiplications produces:

$$0.1\ \text{m} = \left(39.2\ \text{m bar}\ c_{b,aquifer1}\right) + \left(257.4\ \text{m bar}\ c_{b,aquifer1}\right) + \left(29.4\ \text{m bar}\ c_{b,aquifer1}\right)$$

$$0.1\ \text{m} = 326.1\ \text{m bar}\ c_{b,aquifer1}$$

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

$$c_{b,aquifer1} = \frac{0.1\text{m}}{326.1\ \text{m bar}} = 3.1 \times 10^{-4}\ \text{bar}^{-1}$$

and,

$c_{b,\text{aquifer2}} = 0.5\ c_{b,\text{aquifer1}} = 1.5 \times 10^{-4}\ \text{bar}^{-1}$

and

$c_{b,\text{aquitard}} = 10\ c_{b,\text{aquifer1}} = 3.1 \times 10^{-3}\ \text{bar}^{-1}$.

Return to Exercise 3.1

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

About the Authors



Giuseppe Gambolati is professor of Numerical Methods in Engineering in the School of Engineering of the University of Padova. He is the author of about 300 scientific papers in internationally refereed journals, books and proceedings, and two books of Numerical Analysis and Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences which are used as textbooks for both undergraduate and graduate courses in the University of Padova. With Pietro Teatini he is the author of the book "VENICE SHALL RISE AGAIN" (Elsevier, 100 pp, 2014) that provides an overview of the project to raise Venice by injecting seawater into a 650-1000 deep geologic formations underlying the lagoon. He was the recipient of the 2008 IACMAG excellent contributions award for "significant contributions in research, academic activities and professional service in different regions of the globe". He is FELLOW of the American Geophysical Union (AGU) for "his unique and seminal contributions to geomechanical aspects of subsurface fluid flow". He was also appointed "Commendatore" of the order to the merit of the Italian Republic by the President Giorgio Napolitano. His research and professional activity are mainly concerned with studies of natural and anthropogenic land subsidence, groundwater flow, and subsurface contaminant transport, and the development, validation and implementation of the corresponding numerical methods and models in real world problems.



Dr. Pietro Teatini is associate professor in Hydrology and Hydraulic Engineering at the Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Padova, Italy. In 1994 he received the International Award "Paolo Gatto", Accademia Nazionale dei Lincei, for the modeling of the aquifer system underlying the Venice Lagoon. He is co-founder of M3E S.r.l., a spin-off of the University of Padova, associated researcher at the Italian National Research Council, and associated scientists at the Key Lab of Earth Fissure and Geologic Disasters (Nanjing, China), and Key Lab of Land Subsidence Monitoring and Prevention (Shanghai, China). Currently, he is chair of the IAHS/UNESCO-IHP "Land Subsidence International Initiative - LaSII". His research interests concern modeling geomechanical issues related to fluid withdrawal and injection from/into the subsurface, specifically land subsidence and uplift, induced seismicity, and aseismic earth fissuring accompanying land subsidence. He also focusses his research interest on the evolution of managed peatlands and transitional environments. He has more than 130 papers in peer reviewed international journals.

The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Please consider signing up to the Groundwater Project mailing list and stay informed about new book releases, events and ways to participate in the Groundwater Project. When you sign up to our email list it helps us build a global groundwater community. Sign-up↗.



The GROUNDWATER PROJECT ©The Authors Free download from gw-project.org
Anyone may use and share gw-project.org links. Direct distribution of the book is strictly prohibited.

Science of the Total Environment 903 (2023) 166803

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Coupled processes of groundwater dynamics and land subsidence in the context of active human intervention, a case in Tianjin, China

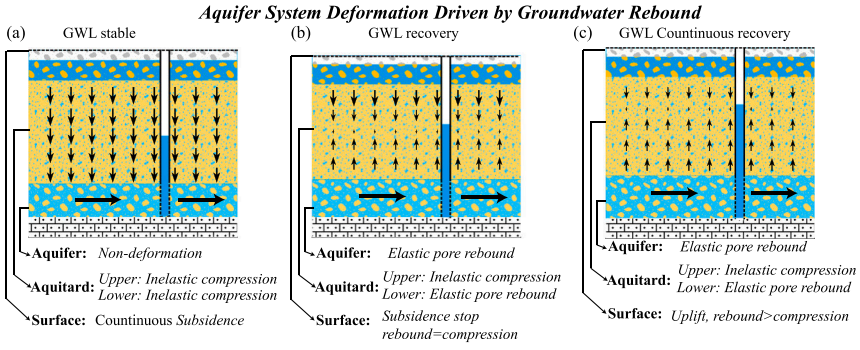
Guangli Su [a,b], Chunbao Xiong [a,*], Guiying Zhang [c], Yong Wang [d], Qiang Shen [d], Xiaohu Chen [d], Hewen An [a], Longchao Qin [a]

[a] School of Civil Engineering, Tianjin University, China
[b] The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China
[c] Hydrology Center of Liaocheng, Shandong Province, China
[d] Tianjin hydrology and water resources management center, China

HIGHLIGHTS

- South-to-North Water Transfer Project restored groundwater levels in Tianjin.
- South-to-North Water Transfer Project mitigated land subsidence in Tianjin.
- The depletion of groundwater storage in Tianjin has significantly decreased.
- The recovery capacity of Tianjin's aquifer system surpasses expectations.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Martin Drews

Keywords:
South-to-North water transfer project
Groundwater
Land subsidence
Groundwater storage variation
North China Plain

ABSTRACT

To address the crisis of water shortage in the North China Plain, the Chinese government implemented the South-to-North Water Transfer Project (SNWTP). In this context, Tianjin, one of the main beneficiaries of this project, has been relieved from water shortages and begun to implement Groundwater Management Plans (GMP) since 2018, which undoubtedly have a significant effect on the groundwater recovery. Meanwhile, this provides a good case for studying the coupled process of ground settlement and groundwater dynamics, especially the soil deformation pattern driven by groundwater level (GWL) rebound. To analyze these issues in detail, field well data was collected to depict groundwater flow field. Moreover, geodetic data was also collated, including leveling, GPS, and InSAR, so that a vertical deformation field with high spatiotemporal resolution could be generated. The results reveal that the GWL of the third confined aquifer which is the main exploitation layer in Tianjin recovered significantly since 2018 with a rate of 2.1 m/yr. The dynamic deformation patterns indicate that the area of land subsidence cones in Tianjin has reduced significantly, accompanied by a sharply declining subsidence rate (decreased from −32.2 mm/yr to −4.5 mm/yr.). Particularly, a significant poroelastic rebound has occurred in the Wuqing and Beichen districts since 2020. Furthermore, due to the delayed pore pressure dissipation in the aquitard, we find a time delay of 0.3–5.5 years between land subsidence and GWL time series,

* Corresponding author.
E-mail address: xiongchunbao@163.com (C. Xiong).

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166803
Received 26 May 2023; Received in revised form 21 July 2023; Accepted 2 September 2023
Available online 9 September 2023
0048-9697/© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.

which is far less than that estimated by hydrogeological parameters, as the latter ignored the recharge and recovery capacity of the aquifer system. Finally, an evolution models in Tianjin was presented to illustrate interactive process among the deformation, pore pressure, and hydraulic head. In general, the SNWDP and the GMP has restored the pore pressure of aquifer, reduced the land subsidence, and alleviated the groundwater storage depletion of Tianjin.

1. Introduction

Groundwater is an important strategic resource, and plays a key role in ensuring a long-term supply of drinking water and environmental security. In the North China Plain (NCP, Fig. 1a), groundwater is of vital importance, supporting >60 % of total water consumption (Feng et al., 2018; Feng et al., 2013). Since the 1970s, the NCP's industrial and public water consumption has exceeded the carrying capacity of its surface water sources, resulting in long-term groundwater overexploitation. This has led to the formation of multiple groundwater level (GWL) depression cones and land subsidence funnels (Gong et al., 2018; Long et al., 2020; Yang et al., 2022). Observations indicate that the shallow GWL of the Taihang piedmont alluvial proluvial plain, located in the west of the NCP, has declined by 60 m. Moreover, the deep GWL in the central and eastern plains has decreased by >90 m (Shi et al., 2014; Yang et al., 2021; Zhu et al., 2022). Overexploitation of groundwater has destroyed the original stress state in the aquifer system, reduced pore pressure, and increased the effective stress of the skeleton. This resulted in an elastic compaction of the sand layer (i.e. aquifer) and an inelastic consolidation of the clay layer (i.e. aquitard), which manifests as land subsidence at the earth surface (Bai et al., 2022; Hoffmann et al., 2003; Hu and Bürgmann, 2020; Zhang et al., 2022). According to recent research (Su et al., 2021), areas with a subsidence rate >20 mm/yr within the NCP has increased from 6200 km^2 in the 1960s to 41,800 km^2 in the 2010s.

To address the situation of water resource shortage and groundwater overexploitation in the NCP, China implemented the South-to-North Water Transfer Project (SNWTP), the role of which is to transport the excess surface water from southern China to the north (Liu et al., 2021; Yang et al., 2022; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2020). The water in the middle route of this project flows from the Danjiangkou Reservoir in the Han River Basin to Henan and Hebei provinces and the Xiheishan

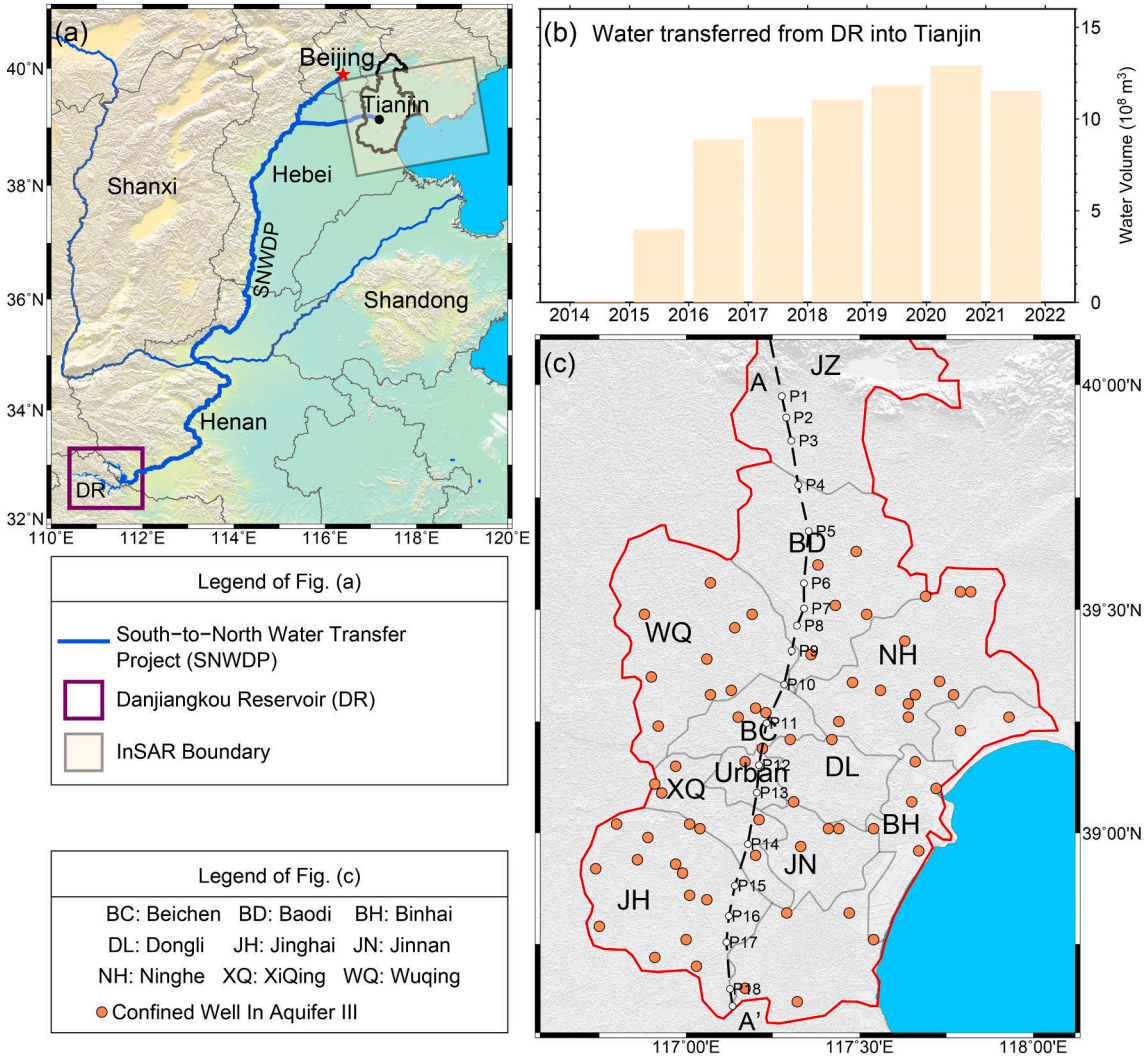


Fig. 1. Background Map of the Study Area; (a) Route map of the South-to-North Water Transfer Project (SNWTP); (b) Amount of water supplied from the SNWTP to Tianjin; (c) Distribution of water wells on the aquifer III in the Tianjin area.

Water Diversion in Baoding before turning northward to Beijing, then eastward to Tianjin (Fig. 1a). By the end of 2021, the city of Tianjin, a major water recipient of the SNWTP, had received a total input of 7.03 billion m^3 since 2014 (Fig. 1b) (TJWA, 2021). This significantly alleviated the problem of water shortages and created the conditions for replacing groundwater sources. In this context, the Tianjin Municipal Water Affairs Bureau implemented its Action Plan for Comprehensive Control of Groundwater Overexploitation in Tianjin (hereafter referred to as the Groundwater Management Plan, GMP) from 2018 to 2020. This plan consists of two parts. The first part is to replace the groundwater with the water from the SNWTP. For example, through the construction of water plants and water distribution networks, the distributed water will be supplied to rural areas, cities, and enterprises which used to get their water supplies through the exploitation of groundwater. According to the survey, 7910 pumping wells were shut down in Tianjin from 2019 to 2020, with 115 million m^3 of deep groundwater replaced (Li et al., 2022a). The second part is to replenish the ecological water in rivers and lakes to restore the hydraulic connection between the earth's surface and the groundwater (Guo et al., 2021; Zhu et al., 2022). According to the relevant data, the total volume of water replenishment reached 2.97 billion m^3 in 2019–2020 (Li et al., 2022a). The implementation of the GMP is bound to have a significant effect on groundwater dynamics in Tianjin, as well as the resultant soil deformation.

At present, some scholars has shown that, after the completion of the SNWTP in 2014, the amount of groundwater exploitation in the areas along the waterway has been greatly reduced (Lei et al., 2022), resulting in the end of GWL decline and an increase of groundwater storage (GWS) recovery in some local area of Handan, Xingtai, Shijiazhuang, and Beijing (Jia et al., 2020; Long et al., 2020; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2020). Additionally, land subsidence rates in these areas have also steadily slowed (Du et al., 2021; Lei et al., 2022; Li et al., 2022b; Zhang et al., 2022; Zhou et al., 2019). However, there are few comprehensive reports on the groundwater flow field and land subsidence in Tianjin after the SNWTP and GMP. Furthermore, the research on the feedbacks mechanism between groundwater dynamics and aquifer/aquitard deformation is still relatively weak, especially the soil deformation pattern driven by GWL rebound is particularly scarce. Therefore, we collected a large amount of groundwater and geodetic data in Tianjin to characterize the GWL flow field and ground subsidence in Tianjin before and after the SNWTP and GMP. More importantly, we present a case of GWL recovery and its driven soil deformation under active human intervention policy. These are important for further study of land settlement mechanism and soil deformation intrinsic relationship.

Therefore, this study is organised as follows: GWL data was first collected for the Tianjin area, after which a least squares collocation method was introduced to understand the groundwater flow field and its variations. Geodetic data including leveling, GPS, and InSAR, and a Helmert dynamic adjustment and GPS-corrected InSAR method was employed to generate a vertical deformation field with high-precision and high spatial-temporal resolution. Based on this, the temporal and spatial correlations between GWL variations and surface deformation could be compared. In particular, the mechanisms of surface deformation lagging behind GWL variations were discussed in detail. Finally, based on the principle of effective stress, the GWS in the confined aquifer was estimated. This research is of great significance in supporting the precise control of groundwater overexploitation in Tianjin, the restoration of GWL depression cones, and the targeted development and management of groundwater sources.

2. Study area

2.1. History of goroundwater exploitation and land subsidence in Tianjin

Tianjin, situated in the northeast of the NCP, at the foot of Yanshan Mountain and on the eastern coast of the Bohai Sea (Fig. 1a), with an area of 11,966 km^2. Its current jurisdictional areas include the Central Urban District, Binhai, Dongli, Xiqing, Jinnan, Beichen, Wuqing, Baodi, Jinghai, Ninghe, and Jizhou District (Fig. 1c). Located in a warm temperate zone with a subhumid monsoon climate, Tianjin has seen an annual precipitation of approximately 600 mm, and a per capita water source of <100 m^3. It is a city suffering from a serious shortage of water sources. Therefore, groundwater has always been the main source of water in this area before the SNWTP.

The large-scale exploitation of groundwater in Tianjin can be dated back to 1923 (Yang, 2005). As a result, the region suffers the most extensive groundwater exploitation and the most severe land subsidence in the NCP (Guo et al., 2015). The GWL reduction in the third and fourth confined aquifer groups reached 90 m by 2015 (Ha et al., 2020). The results of deformation monitoring show that severe land subsidence occurred in the Tianjin urban area between the 1960s and the 1980s. In this period, the maximum subsidence rate reached −87.2 mm/yr, with an average of −58.2 mm/yr in the central urban and coastal areas of Tianjin (Su et al., 2021). Since the completion of the Luanhe River Diversion Project in 1983, water shortages in the Central Urban District of Tianjin have been reduced and the negative development trend of land subsidence has been suppressed (Yang, 2005). However, with the rapid development of the suburban county economy starting in the 1990s, the center of land subsidence has shifted from the Central Urban District to the suburban areas, including Wuqing, Jinghai, and Beichen. In these districts, the subsidence rate reached 60 mm/yr in 1992–2000, and areas with subsidence rates >50 mm/yr covered about 85 km^2 (Zhang et al., 2016). After 2000, land subsidence entered a phase of rapid development with a maximum subsidence rate of 135 mm/yr, while the area with a subsidence rate >50 mm/yr increased by a factor of 32, going up to 2750 km^2 (Liu et al., 2016; Zhang et al., 2019; Zhang et al., 2016). Rapid land subsidence increases the risk of urban flooding, infrastructure damage (e.g. underground pipes, flood bank, high-speed railway, etc.), seawater intrusion, and salinization of aquifers (Herrera-Garcia et al., 2021). In the coastal area of Tianjin, for example, the accumulated land subsidence exceeded 3 m, causing the ground elevation to fall below sea level and flood bank to fail. In September 1985, January 1992, and November 1997, three heavy storms flooded port terminals, freight yards and warehouses, causing huge economic losses (Xu, 2002).

2.2. Hydrogeologic conditions in Tianjin

The groundwater in Tianjin is formed and distributed in such a way that a complete circulation system ranges horizontally from the northern Yanshan Mountain to the coast of the Bohai Sea, which includes a supply area and a discharge area for groundwater. From north to south, the aquifer particles become finer and the sediments in the sandstone strata gradually change from medium-coarse, to medium, medium-fine, and silty fine, with the water yield worsening, the aquifer's overall thickness decreasing, and the clay-based aquitard layer thickening (Fig. 2). Based on hydrogeological stratification characteristics, groundwater occurrence, hydrodynamic characteristics, and water quality, the Quaternary pore water in the plain area can be vertically divided into a shallow layer (consisting of aquifer group I, i.e., the shallow freshwater group and the salt water aquifer group) and three deep confined aquifer groups (including aquifer groups II, III, and IV). The shallow groundwater is suitable for replenishment. Despite a certain degree of exploitation, no depression cone has been formed so far, while the GWL has remained stable during the years of equilibrium (Ha et al., 2020; TJWA, 2021). The water production of a confined aquifer is primarily affected by paleogeographic sedimentary conditions and by the distribution of ancient water systems. From top to bottom, there are three sedimentary cycles, consisting of fine, coarse and finer quaternary sedimentary grains, which make up the confined aquifer groupsII, III, and IV. Among these, aquifer group III is the thickest and most widely distributed, and features the coarsest particles. It has also become the main groundwater exploitation layer in Tianjin in recent years (Zhu et al., 2022), leading to

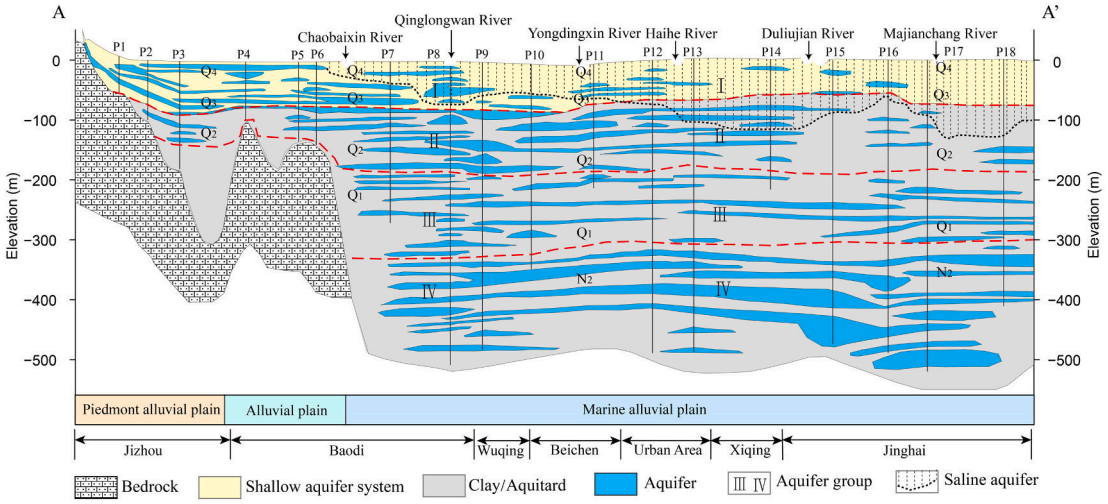


Fig. 2. Hydrogeological profile. See Fig. 1c for its spatial position.

a significant decrease in GWL (Ha et al., 2020; Shi et al., 2022).

3. Data and method

3.1. Groundwater level data

The water level data taken from field wells is a direct representation of the pore pressure and hydraulic characteristics of the aquifers. In this study, GWL was collected from 68 confined wells (Fig. 1c), of which 64 were monitored by the Tianjin Water Affairs Bureau from January 2018 to December 2021, and 4 were monitored by the Tianjin Earthquake Agency from January 2014 to December 2022. These wells are all located in the main contributing layer for groundwater exploitation (aquifer group III) (Zhu et al., 2022), with monitoring depths ranging from 210 to 360 m. These data were collected from the hydrology and water resources management center of the Tianjin Municipal Water Affairs Bureau and the Tianjin Earthquake Agency.

In order to map the location and distribution of the depression cones, as well as the characteristics of the groundwater flow field (e.g. the flow direction and hydraulic gradient) in the study area, the GWL data for the 68 wells was converted to a uniform height reference using surface elevation data at the specific wells. After this, the least squares collocation method (Wu et al., 2016) could be used to express the GWL data as a continuous function $h(\lambda,\phi)$ between the GWL (h) and a location (λ,ϕ) at any point on a spherical surface (λ longitude and ϕ latitude). This enabled a contour map of the GWL to be obtained. Finally, the partial derivative of the function expression on the sphere was calculated directly, in order to obtain the hydraulic gradients $\left(g_\lambda, g_\phi\right)$ along longitude and latitude (Eq. (1)). The total gradient is the sum of the vectors g_λ and g_ϕ.

$$\begin{cases} g_\phi = \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial h(\lambda,\phi)}{\partial \phi} \\ g_\lambda = \dfrac{1}{R\cos\phi}\dfrac{\partial h(\lambda,\phi)}{\partial \lambda} \\ g_t = \sqrt{{g_\phi}^2 + {g_\lambda}^2} \end{cases} \tag{1}$$

where g_ϕ is the north-south hydraulic gradient, with a positive value denoting a northerly gradient and a negative value denoting a southerly gradient; g_λ is the east-west hydraulic gradient, with a positive value denoting an easterly gradient and a negative value denoting a westerly gradient; R is the radius of the earth; λ and ϕ are longitude and latitude, respectively; and $h(\lambda,\phi)$ is the GWL at location (λ,ϕ).

3.2. Geodesy data

Currently, the most common technical approaches for monitoring land subsidence include leveling, GPS, and InSAR, each of which has its own advantages and disadvantages. Leveling measurement is highly accurate, but its spatial resolution is limited (Guo et al., 2019). Continuous GPS (cGPS) observation can accurately detect surface displacement in real-time, but the associated construction costs of GPS stations are high (Jiang et al., 2021). InSAR observation provides high spatial and temporal resolution, but is susceptible to incoherence and atmospheric errors (Cao et al., 2017; Tymofyeyeva and Fialko, 2015). Joint analysis of all three technologies can help obtain high-precision displacement fields with high spatio-temporal resolution. Therefore, precise leveling data, cGPS data, and Sentinel-1 radar satellite data from the Tianjin area were all collected for this study, in order to analyze the development trends of land subsidence in a more comprehensive manner. For example, the precise leveling data could be utilized to define the vertical deformation characteristics of the study area, as well as evaluated the accuracy of the deformation results obtained by InSAR. The data from 21 cGPS stations was used for joint adjustment of leveling data, atmospheric correction of InSAR interferograms, and evaluation of the accuracy of the InSAR deformation time series. InSAR deformation results were used to characterize the detailed nature of land subsidence, to compare surface deformation with GWL variations, and to estimate GWS.

3.2.1. Leveling data and joint adjustment method

The Tianjin Office for Land Subsidence Control has established a high-density leveling monitoring network in Tianjin and adjacent areas, the first-order monitoring network of which is shown in Fig. 3. This network has a length of approximately 1100 km and includes a total of 212 leveling points (including 4 cGPS stations) located at an average interval of 4.2 km, forming 13 closed loops. The leveling data used in this study was collected from three observation campaigns carried out in September to October 2016, August to September 2019, and August to September 2021. All three campaigns were conducted in accordance with first class leveling survey specifications. The specific requirements include, but are not limited to, the sight length and discrepancies between backsight and foresight in each setup being constrained within (3 m, 30 m) and (−1 m, 1 m), respectively, in order to reduce the impact of atmospheric refraction; the maximum tolerant misclosures between back and forth geodetic leveling measurement being $1.8\sqrt{L}$ mm, where L is the distance between adjacent benchmarks, in km; the maximum tolerant misclosure of leveling loop being $2.0\sqrt{S}$ mm, where S is the

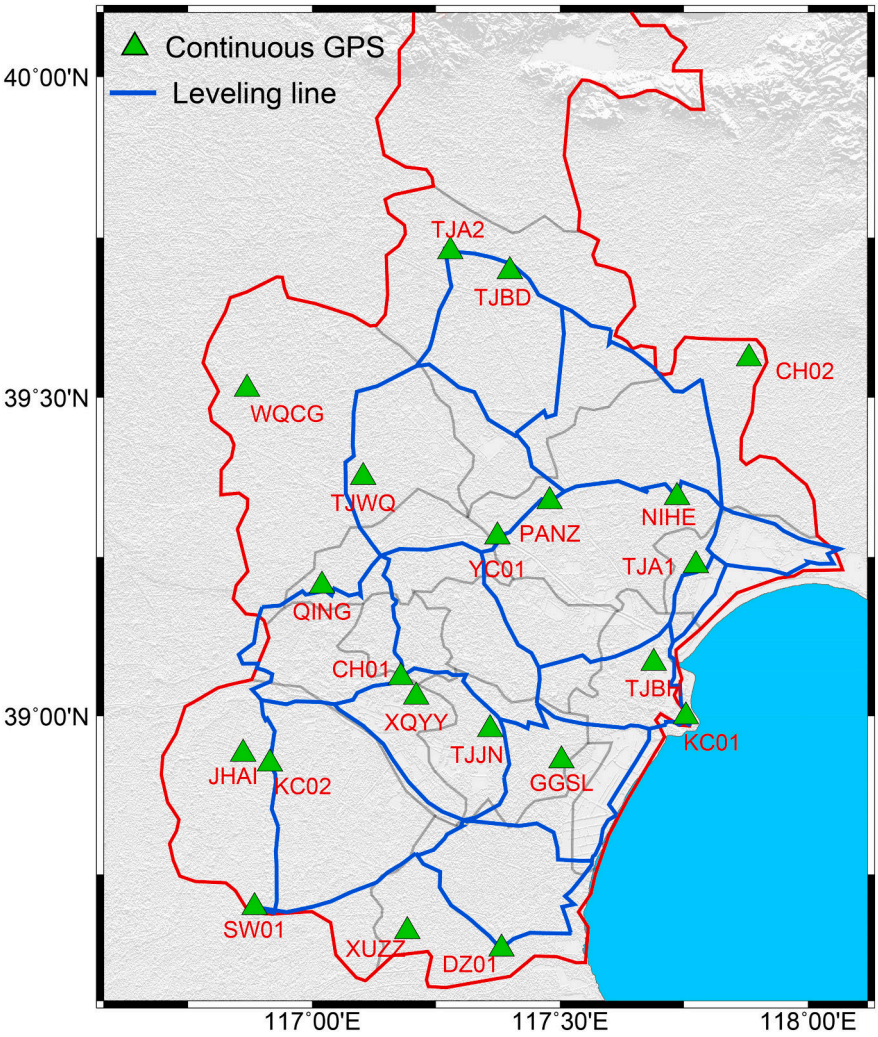


Fig. 3. Spatial distribution of leveling lines and GPS stations.

distance of leveling circle, in km; and the root mean square of the misclosures M_Δ being <0.45 mm.

In this study, the joint dynamic adjustment method proposed by Wu et al. (2021) was employed to estimate the vertical movement rate of the repeating leveling points. The specific process is as follows: the vertical velocity of the cGPS stations in the survey network and the height difference between adjacent leveling point were used to establish an error equation (Eq. (2)), after which the least square method was used to solve the unknown parameters. During this process, the Helmert variance component estimation method was used to assign the weights of two types of data. This joint adjustment method solves the problem of missing references and avoids the consequences of errors accumulating as distances increase during individual leveling adjustment (Su et al., 2021; Wu et al., 2022).

$$\begin{cases} h_{ij} + \delta_{ij} = \left(H_j^0 - H_i^0\right) + \left(v_j - v_i\right)(t - t_0) \\ Vel_k + \delta_k = v_k \end{cases} \tag{2}$$

where the first equation is the leveling error equation, in which h_{ij} is the height difference observed by leveling, δ_{ij} is the observation error, v_i and v_j are the vertical velocity of the points i and j, respectively, H_i^0 and H_j^0 are the elevations of points i and j at time t_0. The second equation is the cGPS vertical velocity error equation, in which Vel_k is the vertical motion rate of point k observed by cGPS, δ_k is the observation error, and v_k is the vertical motion rate of the point k.

3.2.2. GPS processing method

Data from 21 cGPS stations was collected in the study area, the spatial distribution of which is shown in Fig. 3. The GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2018a, 2018b) software was then used in combination with 157 International GNSS Service (IGS) stations distributed evenly around the world to obtain a three-dimensional displacement time series. The specific processing methods and strategies are defined in Zhan et al. (2017). After that, the step offsets in the time series caused by instrument replacement, earthquakes, and other unknown causes were repaired. As the above time series were defined under the reference datum of ITRF 14, they contain a rigid-block motion, as can be seen in the black vector in Fig. S1a in the supplementary material. Therefore, Euler's rotation model (Eq. (3)) (Liang et al., 2022) was used to deduct the rigid-block movement of Tianjin from the horizontal time series (E and N directions) to obtain internal deformation information (Fig. S1b in the supplementary material). The U-direction time series was not processed, and the reference datum remained ITRF14. The above three-dimensional time series were then fitted by a linear+annual+semiannual model to determine the station's horizontal and vertical motion velocities. It can be seen that the horizontal deformation in the Tianjin area is very weak, with an average deformation rate of 2.5 mm/yr.

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} -sin\varphi cos\lambda & -sin\varphi sin\lambda & cos\varphi \\ sin\lambda & -cos\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \tag{3}$$

where v_e and v_n are the eastward and northward velocities of the cGPS station; R is the average radius of the earth; λ and φ are the longitude and latitude of the station; $\begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}$ is rotational angular velocity of Tianjin.

3.2.3. InSAR processing method

In this study, the single-look complex (SLC) data acquired by the Sentinel-1 satellite was used to obtain land motion information. This satellite performs Terrain Observations with Progressive Scans (TOPS), and generates Interferometric Wide Swath (IW) images in VV polarization mode. In this study, 176 images of the Tianjin area collected from October 22, 2014 to April 19, 2022 were used, the footprint for which can be seen in Fig. 1a. The data was processed in the following steps:

A purely geometric alignment method (Xu et al., 2017) was used firstly to align all the SAR acquisitions to the master image (on February 22, 2019). All aligned SAR acquisitions with a temporal baseline of <60 days and perpendicular baseline <150 m were then selected to construct interferograms (Fig. S2 in the supplementary material). Meanwhile, the topographic phase was removed using the digital elevation model (DEM) from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Farr et al., 2007) and the speckle noise was suppressed by down sampling and low-pass filtering of the interferograms at 200 m wavelength. This process generated a total of 824 filtered interferograms with a spatial resolution of about 80 m. After that, the Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping (SNAPHU) (Chen and Zebker, 2002) was used to unwrap the interferometric phase pairs. During this process, significant water bodies (e.g. Bohai Sea, Fig. 1) and low coherence regions were masked and replaced with neighboring interpolation data to improve unwrapping accuracy, following the process outlined by Xu et al. (2021). Once the interferograms were all unwrapped, the coherence-based Short Baseline Subset (SBAS) method (Tong and Schmidt, 2016) was used to estimate the displacement time series. This method uses the coherence of the pixel as the weight in the least squares inversion, rather than completely removing low coherence pixels. This can both improve the reliability of the time series and produce a more spatially dense deformation field. Meanwhile, the common scene stacking method was used along with a first-order differential smoothing factor (Tymofyeyeva and Fialko, 2015; Xu et al., 2017) to reduce the effects of atmospheric turbulence and smooth the displacement time series. Due to the weak horizontal deformation in the Tianjin area (Fig. S1b in the supplementary material), the above displacement time series was directly projected into the vertical direction based on the satellite incidence angle. The above steps were completed using the GMTSAR tool (Sandwell et al., 2011; Tong and Schmidt, 2016; Xu et al., 2017).

Generally speaking, interferograms are often affected by the spatial long wave noises created by atmospheric, orbital, and processing errors (Li et al., 2022c), which greatly limits the measurement accuracy of the InSAR technique. At the moment, these are usually deducted by means of polynomial fitting. However, when the deformation mode resonates with the low-frequency noise described above, the polynomial method often deducts the deformation signal as an error, resulting in systematic bias (Li et al., 2022d). In this study, we used the cGPS displacement time series to suppress the aforementioned errors, as well as link the reference datum of InSAR to GPS (Klein et al., 2019; Neely et al., 2020; Xu et al., 2021). The specific process can be summarized as follows: First, the three-dimensional displacements of the 21 cGPS were projected within the time span of the given interferometric pair to the satellite LOS (line of sight) direction. The residuals between InSAR and GPS were then estimated at each station. After that, the scatter residuals were oversampled to the resolution of the corresponding interferogram, while also performing a spatial Gaussian filtering at a radius of 35 km, which was approximately equal to the average distance between cGPS stations in this region. Finally, the oversampled and filtered residuals could be deducted from the interferogram. The above procedures were then repeated for all interferograms to complete the integration. Fig. S3 in the supplementary material shows an example interferogram of 2017362–2018057 before and after correction.

4. Results

4.1. Groundwater level fluctuation

4.1.1. Temporal variation characteristics of groundwater level

The hydraulic head of the field well, which directly reflects the aquifer pore pressure, is the preferred data for characterizing groundwater dynamics. Fig. 4 shows the temporal variation and spatial distribution characteristics of GWL at the wells. The results show that the GWL exhibited different variational tendencies before and after the GMP implemented since 2018. For example, the GWL at wells 65#, 66#, and 67# stopped declining at rates of 1.8, 1.2, and 6.1 m/yr and began to rise at rates of 2.3, 0.7, and 2.9 m/yr, respectively around 2018 (Fig. 4a, b, and c), while that of well 68# showed similar variations with the inflection point around 2020 (Fig. 4d). According to the stacking analysis of the 68 wells located in aquifer III between 2018 and 2021 (after the implementation of the GMP), the GWL recovered at an average rate of 2.1 m/yr, as shown in the blue curve in Fig. 4e. In contrast, according to a report made by Zhu et al. (2022), the average GWL which was estimated using stacking average method with the wells in aquifer III, declined at a rate of 0.6 m/yr in 2010–2018 before the GMP, as shown in the red curve in Fig. 4e. This reveals that GMP might play a key role in the recovering of GWL. The statistics (Fig. 4f) show that the GWL of the 68 wells fluctuated at a rate of −0.9 m/yr to 7.5 m/yr in 2018–2021, with 60 wells (88 %) showing a rise, and 8 wells (12 %) showing a fall. In terms of spatial distribution (Fig. 4f), the rapid recovery of GWL was mostly concentrated at the intersections of Wuqing and Beichen, as well as the intersections of Ninghe and Binhai, with a recovery rate of approximately 4.4 m/yr. The wells featured with GWL decline are mostly situated in the north of Baodi, with a rate of roughly 0.4 m/yr.

4.1.2. Spatial variation characteristics of groundwater level

To map the spatial characteristics of GWL, the discrete groundwater head of the 68 wells was resampled into a regular grid using the least square collection method, after which contour and gradient maps could be generated for January 2018 (Fig. 5a) and December in 2021 (Fig. 5b) using Generic Mapping Tools GMT (Wessel et al., 2013). The two maps represent, to a certain extent, the GWL characteristics before and after GMP. The counter map of GWL before GMP show that, in January 2018, there were four GWL depression cones located at the intersection of Wuqing, Beichen, Xiqing, throughout the entire area of Jinghai, at the intersection of Dongli, Jinnan, and Binhai, and in northern Binhai (Fig. 5a). The depth of GWL in the center of the cones exceeded 75 m, with the hydraulic gradient lying within 2.5–4.5 $\times$ 10^{-3} at the edge of the cones. The statistics show that the average GWL was −57.1 m in January 2018, and that the area with GWL depth >70 m covered 2530 km^2, accounting for 21.2 % of the total area. The contour map for December 2021 (Fig. 5b) shows that the GWL depression cones recovered significantly, while the hydraulic gradient decreased within a range of 1.0–3.0 $\times$ 10^{-3} after the GMP. At the same time, the average GWL increased by 7.6 m to −49.5 m, while the area with GWL depth >70 m decreased by 85 % to 380 km^2. The recovery of GWL indicates that the water source conversion project implemented since 2018 was effective, since this project replace groundwater with SNWTP as a water source, thus greatly reducing the extraction of groundwater.

Fig. 6 is an annual variation distribution map of GWL (i.e. the GWL difference between the beginning and the end of the year), demonstrating its dynamic characteristics. In 2018 (Fig. 6a), the GWL rose by an average of 0.7 m, with the Central Urban District rising significantly by 3.0–4.0 m, while the GWL in northern Tianjin and western Jinghai declined slightly, by 0–1.5 m. Furthermore, there was a 4.0 m depression cone situated in northern Binhai. In 2019 (Fig. 6b), the average GWL variation was +1.5 m, with a significant rise of up to 4.0 m in Wuqing

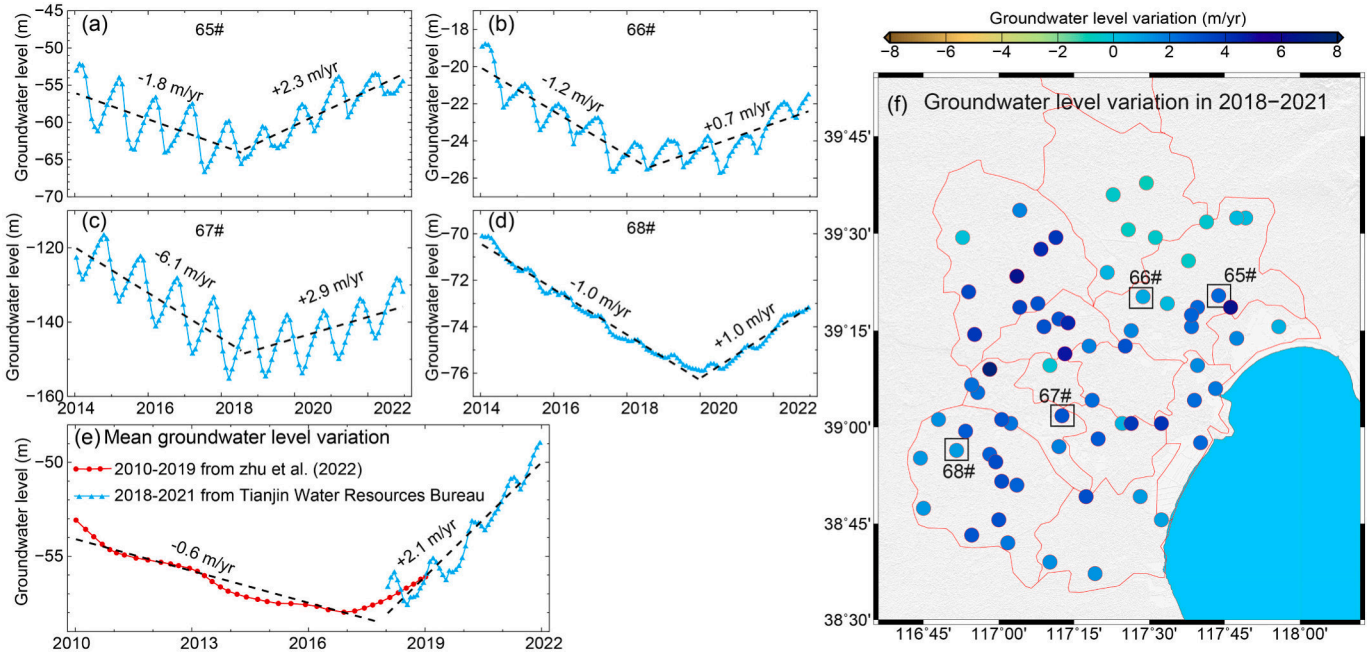


Fig. 4. Groundwater level (GWL) variations in confined aquifer III; (a), (b), (c), and (d) are the time series of GWL variation in 2014–2022 of wells 65#, 66#, 67#, and 68#, respectively; (e) is the average GWL variation of the confined aquifer III in 2010–2021; (f) is the spatial distribution map of the GWL variation rate of the 68 wells in 2018–2021.

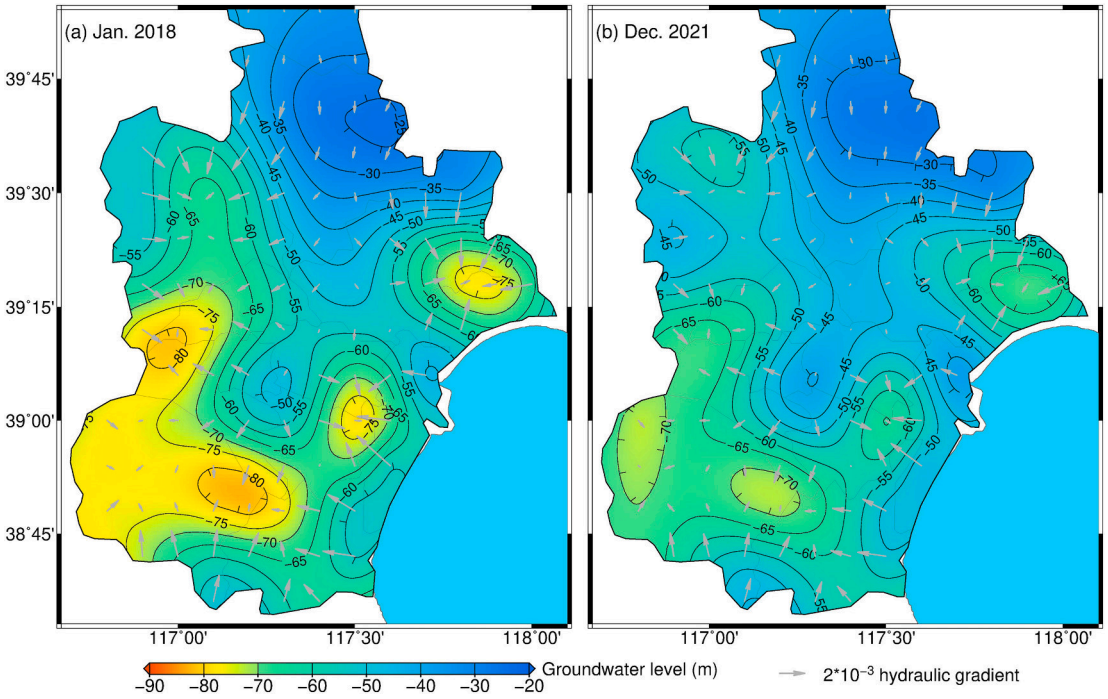


Fig. 5. Groundwater level (GWL) contour map of confined aquifer III in Tianjin; (a) GWL contour line in January 2018, (b) GWL contour line in December 2021.

and northern Binhai, respectively. Except for the northern region, all other regions exhibited a recovery tendency. In 2020 (Fig. 6c), the average variation was +2.8 m, with the southern part of Wuqing showing the greatest increase, at 6.0 m. In addition, the intersection of Dongli and Binhai, as well as the northern part of Binhai, rose by >4 m. In 2021 (Fig. 6d), the average variation was +2.3 m, while the GWL throughout the region recovered by >4 m (with Wuqing being the most significant).

4.2. *Vertical deformation*

4.2.1. *Vertical deformation estimated by leveling*

Using precise leveling data from three campaigns completed in 2016, 2019, and 2021, combined with the dynamic adjustment method, the vertical motion rates of 212 leveling points in the study area during the periods of 2016–2019 (Fig. 7a) and 2019–2021 (Fig. 7b) were obtained. During the first period (Fig. 7a), the vertical rate of each benchmark lay between −89.1 and 0.4 mm/yr, with a mean value of −25.7 mm/yr. The

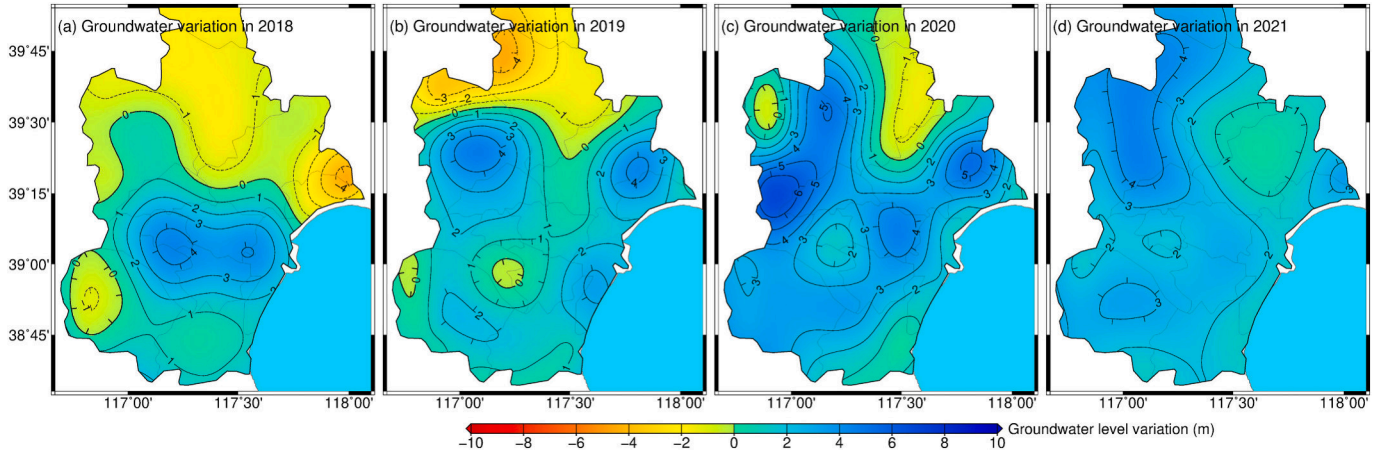


Fig. 6. Annual groundwater level (GWL) variation in Tianjin, with (a), (b), (c), and (d) corresponding to GWL variations in 2018, 2019, 2020, and 2021, respectively.

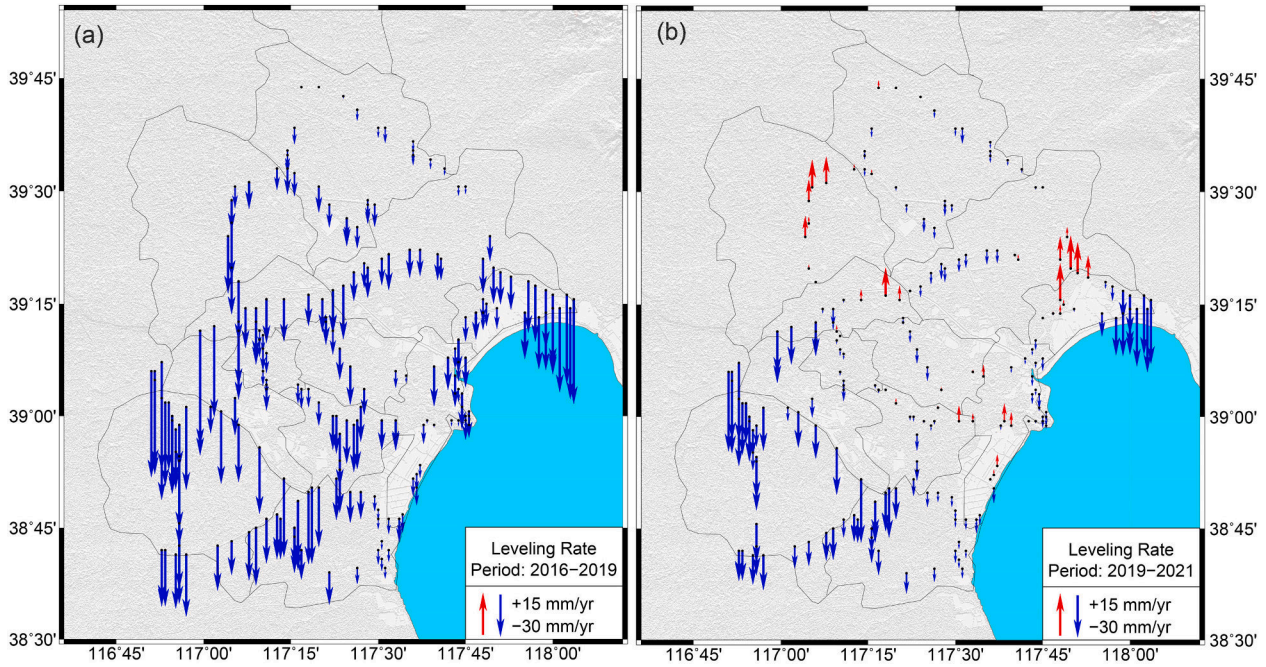


Fig. 7. Vertical motion rates in the Tianjin area in (a) 2016–2019 and (b) 2019–2021, both estimated from precise leveling.

average rate error was 1.9 mm/yr. Specifically, there were 201 points with a settlement rate >5 mm/yr, accounting for 94.8 %. The rapid settlement was generally found in the west of Beichen (approximately −80.0 mm/yr), north Jinghai (approximately −60.0 mm/yr), the intersection of Jinghai and Binhai (approximately −55 mm/yr), and the north of Binhai (approximately −65 mm/yr). Those points tend to share the same spatial characteristics as the groundwater depression cones (Fig. 5a), indicating that land subsidence in Tianjin is primarily caused by groundwater exploitation. During the second period (Fig. 7b), the benchmark rates lay between −57.0 and 12.7 mm/yr, with a mean value of −10.4 mm/yr (an average error of 2.1 mm/yr). There were 125 points with a settlement rate >5.0 mm/yr, accounting for 59.0 %, which represented a 35.8 % decrease from the first period. The spatial distribution of sedimentation cones is mostly consistent with that of the first stage, while the sedimentation rate significantly decreased. It is notable that the vertical motion changed from subsidence (in the preceding period) to uplift at Wuqing, Beichen, the intersections of Jinnan and Binhai, and at the intersection of Ninghe and Binhai, with the highest uplift rates at 9.4, 10.0, 6.0, and 12.7 mm/yr, respectively. These deformation recovery areas remained essentially consistent with the spatial distribution of the high GWL recovery rate shown in Fig. 4f, suggesting that the increasing pore pressure led to an uplift of the land surface.

4.2.2. *Vertical deformation estimated by InSAR*

1) Cumulative vertical displacement

High spatio-temporal resolution vertical motion fields were obtained for the Tianjin region using radar images dating from 2014 to 2022. The cumulative ground displacement (Fig. 8a) indicate that most areas of Tianjin subsided from 2014 to 2022, with the area south of Wuqing subsiding most significantly by up to 800 mm, at a rate of over 100 mm/yr (Fig. 8b). Second to this was the west of Jinghai, which subsided by over 400 mm, at a rate of over 50 mm/yr. Furthermore, settlement funnels larger than 200 mm were also found across Jinghai, at the intersection between Jinghai and Binhai, and in the north of Binhai, where the corresponding rate exceeded 30 mm/yr. In contrast, the settlement in the Central Urban District was <100 mm, with a

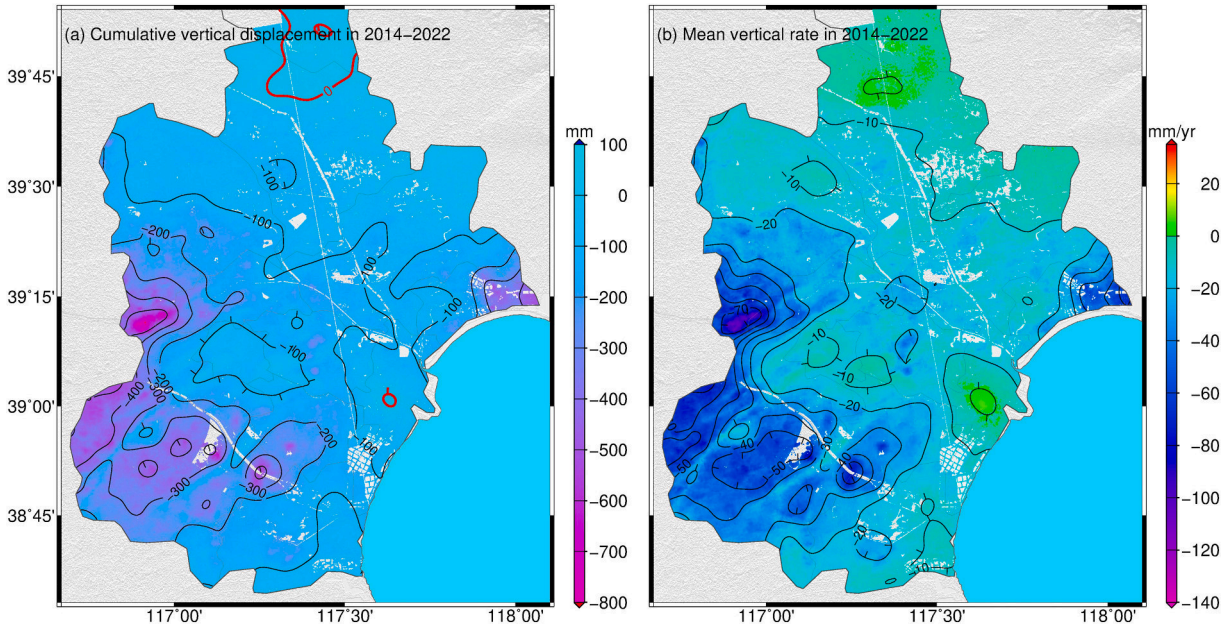


Fig. 8. (a) Cumulative vertical displacement and (b) Average vertical motion rate in Tianjin from 2014 to 2022.

corresponding rate of <10 mm/yr, which might be a result of these areas benefitting from stricter groundwater management policies. In general, the distribution and magnitude of settlement cones observed by InSAR are basically consistent with the leveling (Fig. 7). Moreover, the subsidence funnels and the GWL depression cones (Fig. 5) are also consistent, which confirms that the vertical movement in the Tianjin area was controlled by the pore pressure variations of the aquifer. According to the statistics, in 2014–2022, areas with a settlement rate >50 mm/yr, 20 mm/yr, and 5 mm/yr were 720 km^2, 3410 km^2, and 8460 km^2, accounting for 6.0 %, 28.4 %, and 70.5 % of the total area.

2) Annual vertical velocity

Fig. 9 shows the annual vertical motion rate from 2015 to 2021, in order to depict the spatio-temporal evolutionary characteristics of land subsidence in Tianjin. It shows a general trend of shrinkage in area and

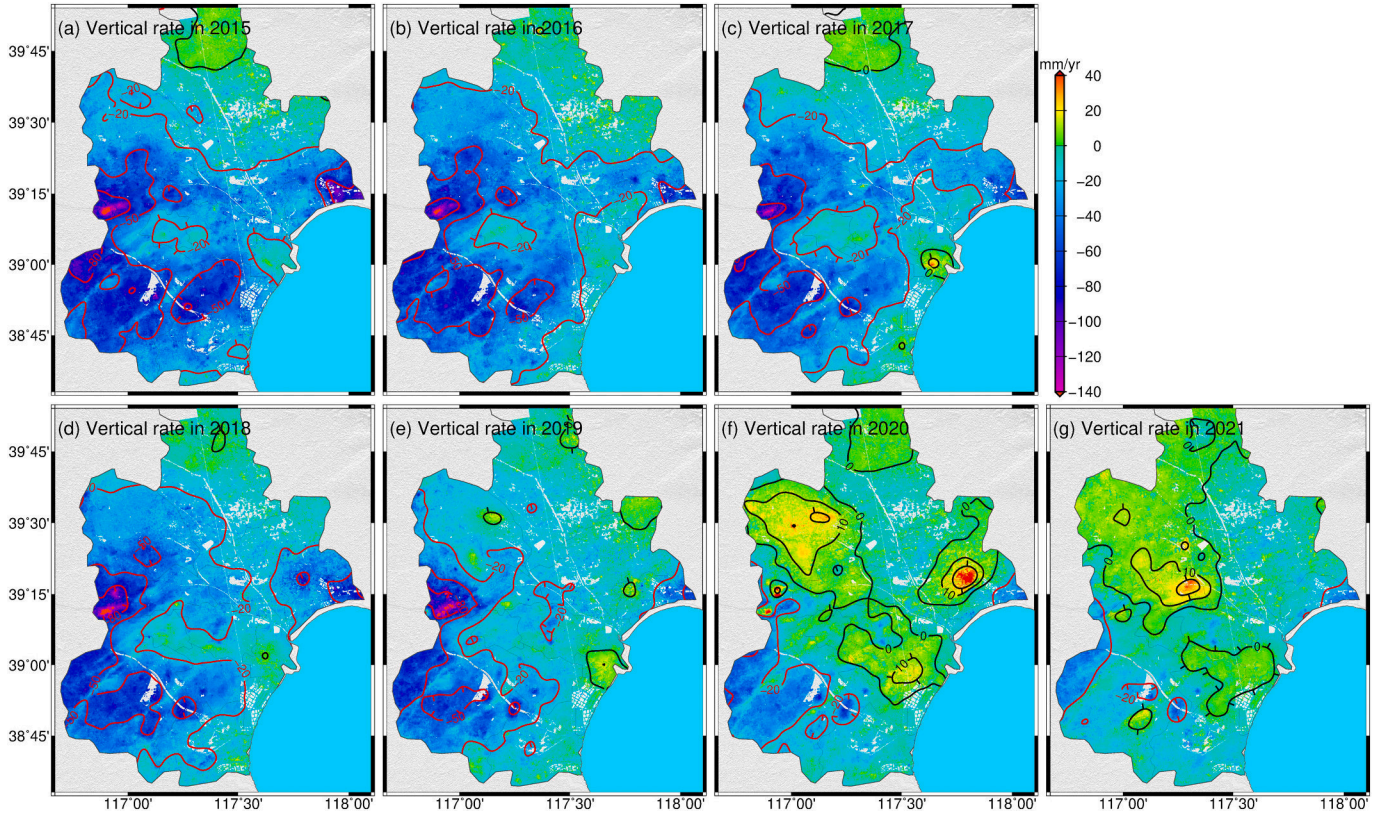


Fig. 9. Annual vertical motion rates of Tianjin from 2015 to 2021.

decrease in motion rate. Specifically, land subsidence in 2015–2018, prior to the implementation of the GMP, was quite serious, with subsidence cones primarily concentrated in the south of Wuqing, the entire area of Jinghai, the intersection of Jinghai, Binhai, Jinnan, and the north of Binhai. The corresponding subsidence rates were 50–130 mm/yr, 50–90 mm/yr, 50–80 mm/y, and 50–90 mm/yr, respectively. The subsidence rate in the Central Urban, Baodi, northern Ninghe, and northern Wuqing areas were <20 mm/yr. In contrast, from 2019 to 2021, the rate of land subsidence greatly decreased with the implementation of the GMP. By 2021, areas with a subsidence rate >50 mm/yr had basically disappeared, and only a small portion of western Jinghai and northern Binhai retained a subsidence rate >20 mm/yr. It is notable that since 2020, Wuqing, Beichen and northern Binhai have begun lifting up, with a rate of over 10 mm/yr in local areas. The relevant literature show that the tectonic movement and the loading deformation caused by surface material redistribution is <1.0 mm/yr in Tianjin (Wang et al., 2022). It can therefore be confirmed that these uplifts were caused by the poroelastic rebound of the aquifer system, which might happen in both aquifers and aquitards (see Sections 5.2 and 5.3 for more explanation). Poroelastic rebound has been recorded on several occasions in other parts of the world. For example, the Huairou Groundwater Protection Zone in Beijing showed a 40 mm uplift due to a rise in GWL from October 2018 to January 2019 (Li et al., 2022b). In Phoenix, Arizona (Miller and Shirzaei, 2015), a poroelastic rebound zone with a rate of 6 mm/yr was observed near a groundwater storage reservoir. Chaussard et al. (2014) discovered that the cumulative rebound of the Santa Clara basin in the San Francisco Bay Area reached 9 cm, accounting for about 9 % of the total settlement, due to groundwater replenishment. The rebound in the western and central margins of the Taipei Basin in Taiwan has reached approximately 6.7 cm and 16 cm since 1989, respectively (Chen et al., 2007).

According to the statistics (Fig. 10), between 2015 and 2021, areas of severe settlement with a rate >50 mm/yr were 2150, 1690, 1230, 1390, 840, 100, and 11 km^2, respectively for each year, a 99.5 % decrease compared to 2015. The areas with settlement rates >20 mm/yr were 6380, 6090, 4970, 5690, 3330, 1360, and 770 km^2, respectively, a decrease of 88.0 % compared to 2015. The average vertical velocity at all pixels was −32.2, −29.4, −24.6, −27.5, −19.4, −5.3, and −4.5 mm/yr, respectively, a decrease of 86.0 % compared to 2015.

Combined with the variation of GWL in Section 4.1, and that of surface deformation in 4.2, it can be preliminarily concluded that the SNWDP has enabled Tianjin to be independent in terms of groundwater, and in this context, the GMP implemented in Tianjin has restored the pore pressure of the aquifer and greatly reduced land subsidence.

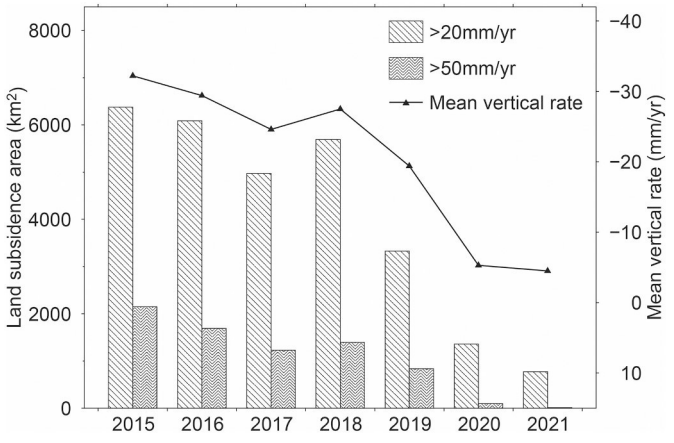


Fig. 10. Settlement areas and average rate data for Tianjin from 2015 to 2021.

4.3. Comparison between groundwater level and vertical surface deformation

4.3.1. Spatial comparison between groundwater level and vertical surface deformation

The annual variation of GWL shown in Fig. 6, and the annual rate of land subsidence shown in Fig. 9, exhibit certain similarities in terms of spatio-temporal characteristics, but also some contradictions. For example, in 2018, the GWL in the Central Urban District rose by 3–4 m, with some of these areas featuring significant vertical uplift. The GWL in northern Binhai dropped by 4 m, while the corresponding subsidence rate exceeded 50 mm/yr. Similarly, in 2020, the GWL in the south of Wuqing rose by >6 m, with the vertical motion rate in this area changing from rapid subsidence in the previous period to a small uplift. In the same year, the GWL rose by >5 m, with the corresponding surface uplift rate exceeding 10 mm/yr in northern Binhai. Moreover, in 2021, the GWL in Wuqing rose by >3 m, featuring surface uplift in most regions. However, there were also some contradictions. For example, the GWL in Jinghai has been rising since 2018, while subsidence still continued until 2021. In 2019, the GWL in Wuqing rebounded significantly, but the ground continued to undergo a certain degree of subsidence. This imbalance is mostly caused by the delayed pore pressure dissipation in the aquitard, which will be discussed in detail in Section 5.2.

4.3.2. Time series comparison between groundwater level and vertical deformation

The time series comparison of GWL variations and vertical displacement is critical for understanding the law of soil deformation driven by groundwater dynamics. Fig. 11 shows the time series of GWL (blue curve) and the vertical surface deformation (orange curve) for certain wells. The time series was then decomposed into trend and seasonal components using the STL method (Cleveland et al., 1990). In the upper panel of Fig. 11, the GWL of wells 65#, 66#, and 67# from 2014 to 2022 (spatial location shown in Fig. 12), showed a variation from decline to recovery, with a transition taking place around 2019. The deformation time series showed similar features, but the inflection point came later. To quantify the time lags, the inflection points of GWL and deformation were determined using a quadratic polynomial to fit the local sequence, which can be denoted as T_g and T_d, respectively. The time delay τ could then be estimated by $\tau = T_d - T_g$. For example, the time delay at wells 65#, 66#, and 67# was 1.2, 2.7, and 3.6 years, respectively. Fig. 11 also shows three other sets of time series located in different hydrogeological units. The wells 9#, 7#, and 10# in the second row of Fig. 11 are located in Baodi in the north of Tianjin, where the aquifer system has a high water yield property, and the thickness of the clay aquitard is relatively thin. The surface displacements of this group respond quickly to GWL variations, with short time delays of 0.5, 0.6, and 0.3 years, respectively. Wells 45#, 47#, and 48# in the third row of Fig. 11 are located in Beichen, where the aquifer system shows a medium water yield and the thickness of the aquitard is larger than in the group above. The displacements showed obvious hysteretic responses to GWL with time delays of 2.5, 2.3, and 2.4 years, respectively, which is longer than that of the above group. Wells 50#, 53#, and 64# in the lowest row of Fig. 11 are located in Jinghai. According to the hydrogeological profile shown in Fig. 2, the aquifer systems in this area show poor water yields and a thick aquitard. This group showed the longest time delays, mesaured at 4.1, 4.3, and 4.6 years, respectively.

Time delays at other wells were also determined, as can be seen in Fig. 12. The results show that, in the area featuring strong water yields and thin aquitards, such as in Ninghe, Baodi, and Wuqing in northern Tianjin, the deformation response to GWL variations is relatively quick, with a short lag ranging from 0.3 to 2.0 years; in weak water yield areas accompanied by a thick aquitard, such as in Jinghai and south of Binhai, the lag is much longer, ranging from 3.5 to 5.5 years. A similar lagging phenomenon was reported by Guo et al. (2015), who estimated a hysteresis of one year to several decades using the hydrological parameter

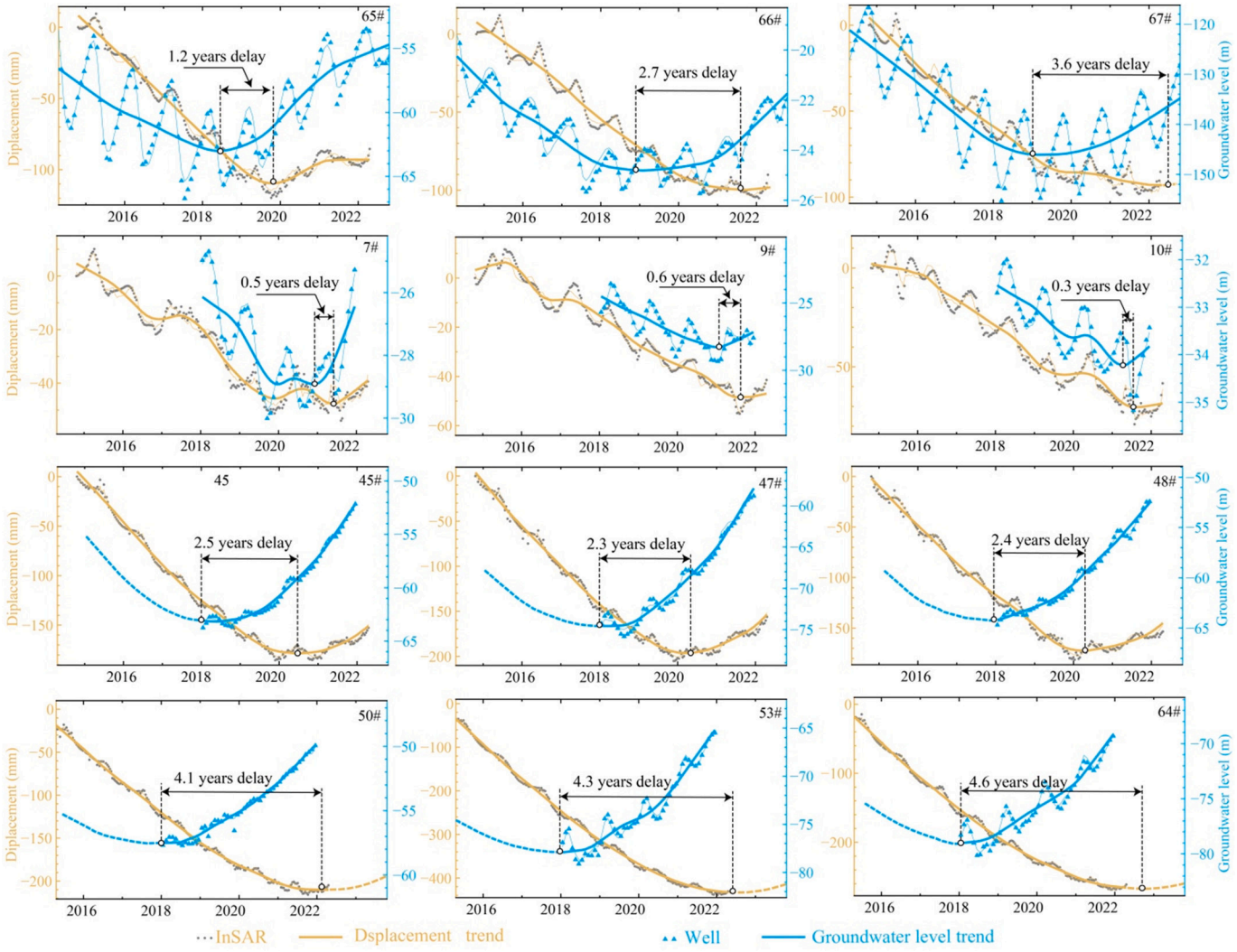


Fig. 11. Time series comparison between groundwater level and vertical deformation.

determined in the laboratory, which is considerably longer than that of this study. The difference will be explained in Section 5.3.

5. Discussion

5.1. Validation of InSAR with leveling and GPS

The vertical motion rate estimated from precise leveling, and the deformation time series obtained through cGPS, are both relatively accurate. They can therefore be used to verify the reliability of the InSAR results. In this study, InSAR and leveling were initially compared through the following steps: Firstly, under the hypotheses of the horizontal deformation being sufficiently weak, the vertical motion rate of the benchmark was projected to the InSAR Los direction. Secondly, the velocities at the benchmark position were obtained from the InSAR deformation field over the same period. Considering the error of the benchmark position, the average velocity of pixel points within a radius of 200 m were taken as the InSAR results. Finally, the residual root mean square (RRMS) was calculated and the residual distribution was mapped in Fig. 13. The results show that in 2016–2019, the residual lay between −10.9 and −8.2 mm/yr, with an RRMS of 2.97 mm/yr. In the period 2019–2021, the residual lay between −7.0 and 6.1 mm/yr, with an RRMS of 2.48 mm/yr. The residuals for both periods approximated a normal distribution, indicating a strong agreement between the two techniques. Similarly, the cGPS observed three-dimensional (i.e. N, E, and U) time series were projected into the InSAR Los direction and compared with those of InSAR. Once again, the RRMS was employed to quantify consistency. The results show that the RRMS of 21 stations ranged between 2.7 and 22.7 mm, with an average of 10.6 mm. Fig. 14 shows 6 examples of comparison, with the RRMS of XQYY and TJBH in the first row of Fig. 14 being 3.6 and 3.8 mm respectively, representing those stations with the highest consistency. The RRMS of CH01 and JHAI were 8.0 and 9.4 mm, representing the consistency level at most stations. The two stations with the highest RRMS were TJWQ and KC02, at 22.5 and 22.7 mm, respectively. This was probably because the cGPS time series contained lengthy time gaps, leading to the presence of uncorrected offsets. Meanwhile, the poor coherence at TJWQ and KC02 may lead to certain unwrap errors, which in turn leads to some uncertainties in the deformation sequence. Generally speaking, the InSAR deformation results were found to be highly consistent with leveling and GPS, indicating that land subsidence results obtained by InSAR are reliable.

During InSAR data processing, the long-wave errors in the InSAR interferograms, primarily caused by atmospheric delay and orbital error, were corrected using cGPS. To verify its effectiveness, the InSAR velocity field with no cGPS correction were compared with the leveling. The results show that the RRMS for the 2016–2019 and 2019–2021 periods were 3.70 and 3.01 mm/yr, respectively (Fig. S4 in the supplementary material). This means that the RRMS decreased by 19.7 % and 17.6 % after cGPS correction, indicating that the above long-wave error

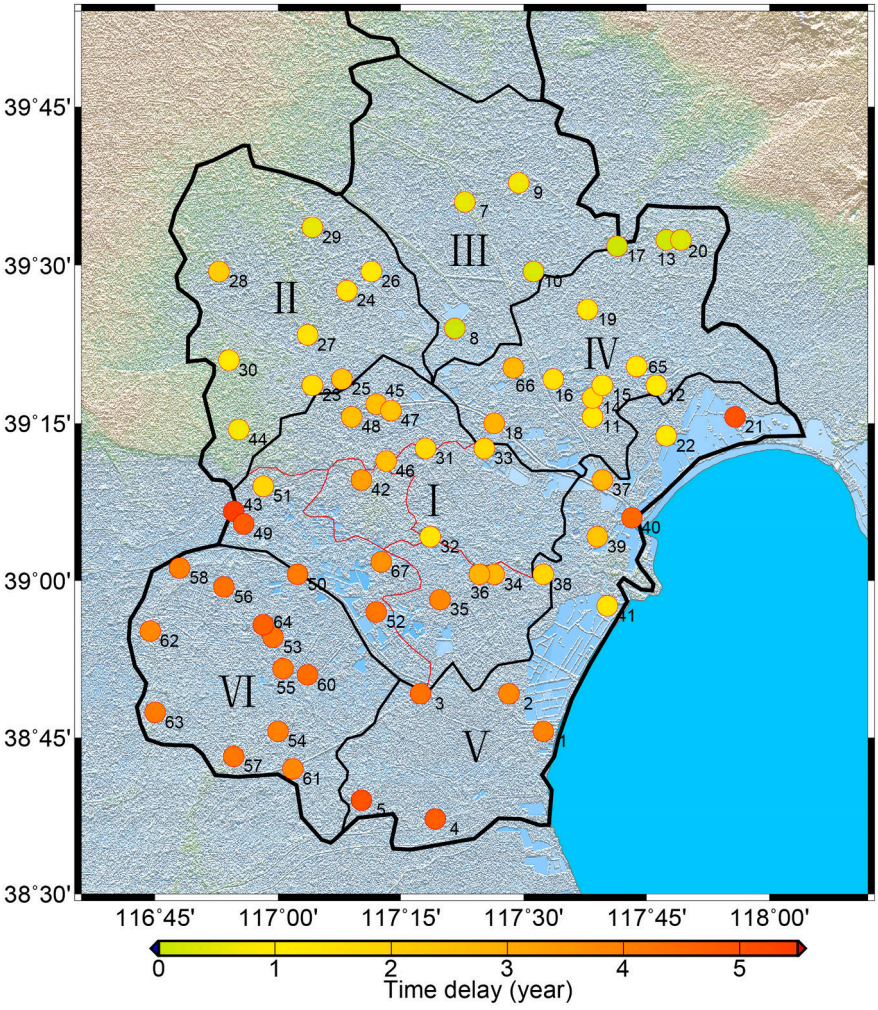


Fig. 12. Spatial distribution of time delay between vertical deformation and groundwater level.

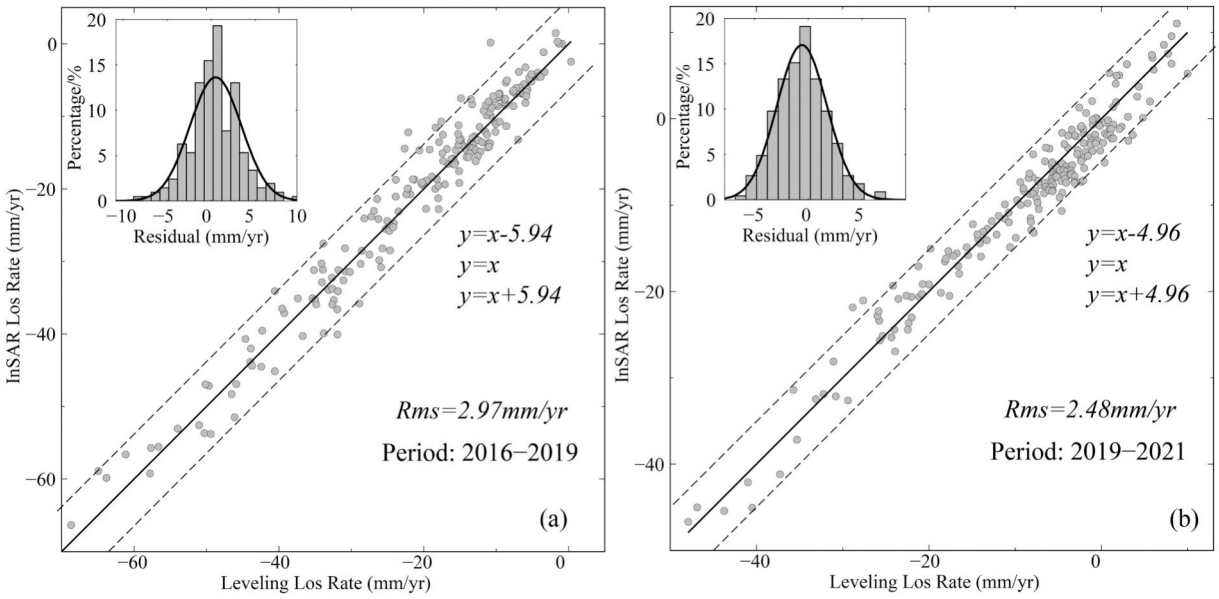


Fig. 13. Validation of InSAR with precise leveling. (a) in the period 2016–2019, (b) in the period 2019–2021.

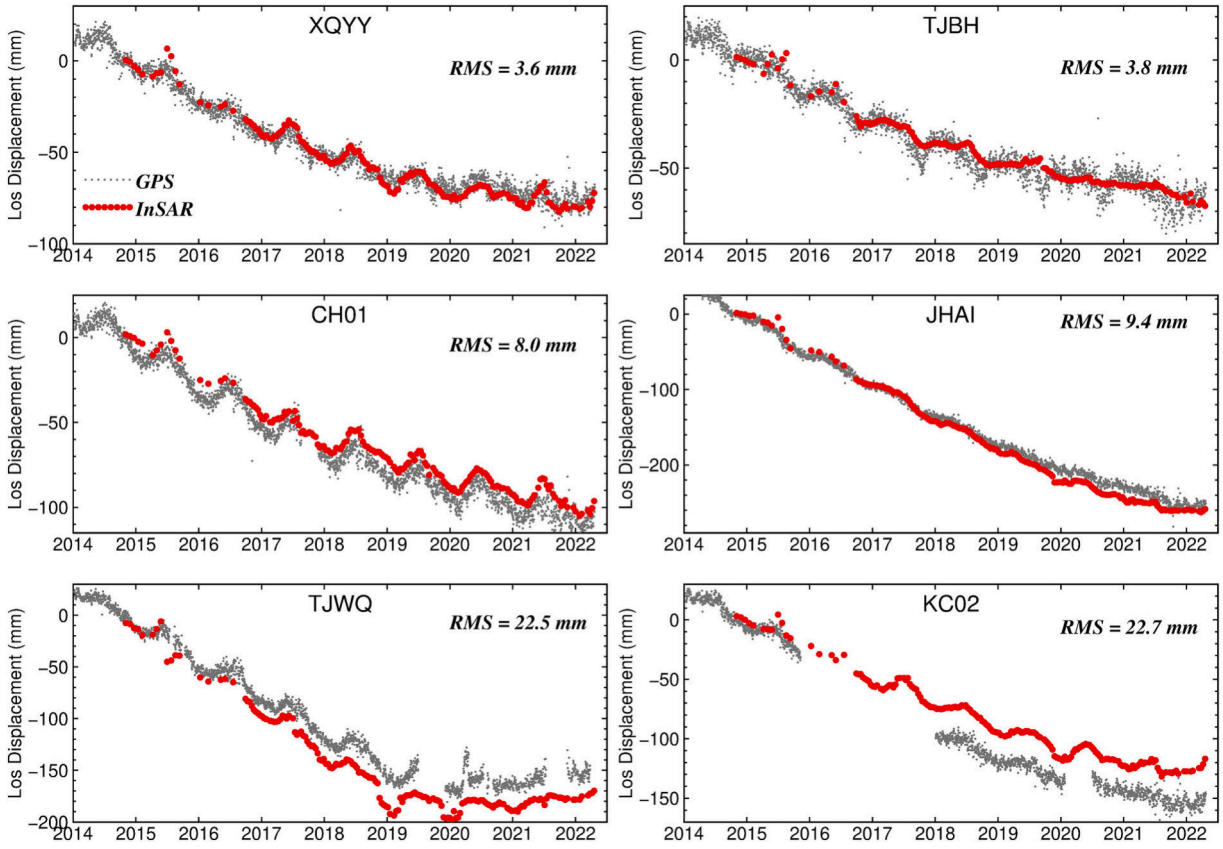


Fig. 14. Comparison of GPS and InSAR deformation time Series in the Line-of-sight direction.

correction method was effective.

5.2. Coupling mechanism between deformation and aquifer pore pressure

In the groundwater exploitation areas, surface subsidence or uplift is primarily caused by pore compression or rebound in the aquifer system, and can be explained using the drainage model based on the effective stress and hydrodynamic consolidation theories (Chaussard et al., 2014). The effective stress principle describes the relationship between pore pressure and vertical stress. In a saturated confined aquifer system, it is assumed that the total stress under load (σ) is constant, which is appropriate for the Tianjin area because the shallow GWL is relatively stable. In the aquifer system, the decrease in pore pressure (p) would correspondingly increase the effective stress (σ_e), resulting in aquifer system compaction. In contrast, when p increases and σ_e correspondingly decreases, this results in aquifer system rebound.

A confined aquifer system can be simplified into two parts: aquifer, which consists of sand, and aquitard, which consists of clay. Due to the large difference in hydraulic conductivity of aquifer and aquitard, the response of pore water pressure to hydraulic head (h) are quite different. In aquifer, the hydraulic conductivity coefficient is large enough to make the pore pressure and hydraulic head quickly achieve equilibrium. Therefore, the strain (Δb) (deformation caused by variations in effective stress) of the aquifer is nearly synchronous with the variations in hydraulic head (Δh). The two satisfy the equation $\Delta b = S \times \Delta h$, where S represents the storage coefficient. Unlike aquifer, due to the low hydraulic conductivity of aquitard (about 1/10 to /1000 of the aquifer) (Chaussard et al., 2014), it takes a certain time for the pore pressure to diffuse, when the hydraulic head of the adjacent aquifer changes. This leads to a continuous soil compression before the pore pressure in the aquitard reaches equilibrium, resulting in a time delay between the surface displacement and GWL. The observations in Section 4.3.2 also verify that land subsidence continues when the GWL changes from a continuous decline to relative stability.

In fact, the hysteresis in the aquitard can be quantified using the one-dimensional diffusion equation (Eq. (4)) (Hoffmann et al., 2003; Miller and Shirzaei, 2015). According to this equation, hysteresis is directly proportional to the square of the thickness and the specific storage coefficient of the aquitard, and inversely proportional to the hydraulic conductivity. This indicates that the larger thickness of the aquitard layer generates a longer lag. This is verified by Figs. 11 and 12, where the lag in clay-rich aquifer systems, such as those in southern Tianjin, is significantly longer than those in sand-rich aquifer systems in northern Tianjin (Fig. 2).

$$\Delta b \approx S \times \left(1 - \frac{8}{\pi^2}\right) e^{\frac{-\pi^2 t}{4\tau}} \times \Delta h$$
$$\mathrm{T} \approx \frac{S_s b_0^2}{4K_V} \tag{4}$$

where S is the storage coefficient, which can be either elastic or inelastic, S_s is the specific storage coefficient, Δh is the hydraulic head in the aquifer, Δb is the deformation occurring in the aquitard, b_0 is the thickness of the aquitard, K_V is the vertical hydraulic conductivity of the aquitard, and T is a compaction time constant, which largely represents the delay of the pore pressure in the aquitard to the hydraulic head of the adjacent aquifer.

5.3. Evolution models for groundwater level and land subsidence in Tianjin

To intuitively exhibit the relationship between deformation, pore pressure, and hydraulic head, a conceptual model in Fig. 15 was mapped, and the full time dynamic process of land subsidence could be presented, which includes occurrence, acceleration, and mitigation. In

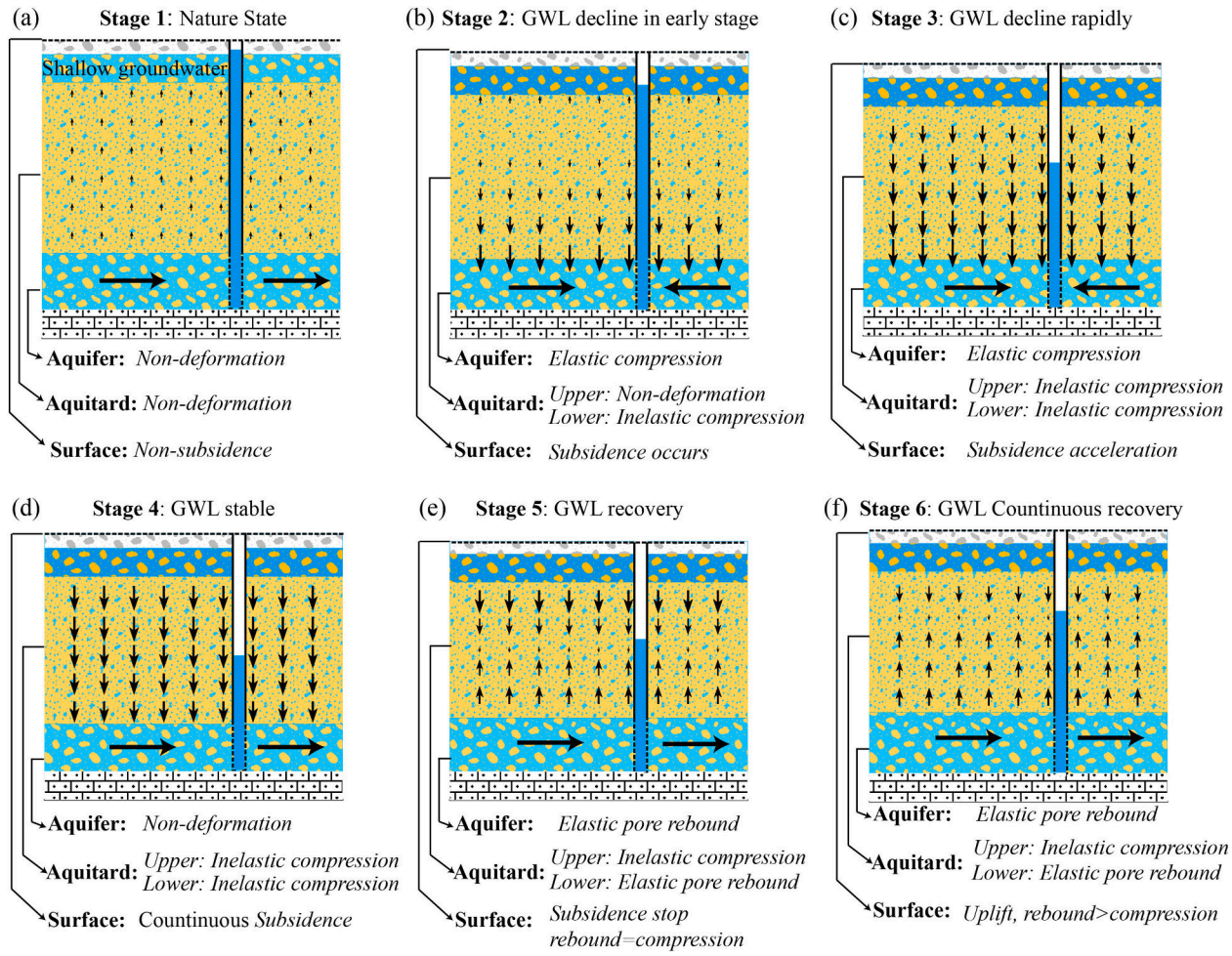


Fig. 15. Schematic model of the interaction of deformation, pore pressure and hydraulic head.

this model, the aquifer system is simplified into a shallow layer, the clay-rich aquitard, and the sandy aquifer, all of which extend infinitely in the horizontal direction. The arrow is used to illustrate the hydraulic gradient. Therefore, the dynamic processes in the aquifer system can be illustrated as follows. In the first stage (Fig. 15a), before the 1920s, the groundwater in Tianjin had not yet been exploited, and the hydraulic head in the aquifer was slightly higher than that of the shallow layer, leading a leaking recharge from the confined aquifer to the shallow layer through the aquitard (Fei et al., 2009). The surface did not deform during this period. In the second stage (Fig. 15b), between the 1920s and the 1960s, the groundwater was first exploited and the hydraulic head decreased. In the aquifer, pore pressure was quickly balanced with the hydraulic head, producing elastic compression. Inside the aquitard, the pore pressure decreased in the lower part, resulting in hydraulic gradients and inelastic compaction, while the pore pressure in the upper part showed a delayed dissipation without deformation due to the small hydraulic conductivity. By this time, subsidence occurred in the surface, as a result of the combined action of the elastic compression of the aquifer and the inelastic compaction of the lower part of the aquitard. In the third stage (Fig. 15c), between the 1960s and the 2010s, groundwater exploitation intensified and GWL decreased significantly. At this point, the pore pressure in the aquifer continued to dissipate, further generating elastic compression. Inside the aquitard, the hydraulic gradient near the aquifer increased, and inelastic compaction became more noticeable. Meanwhile, pore pressure started to decrease in the upper part of the aquitard, creating a hydraulic gradient and an inelastic compaction. The widespread compression in the aquifer system made the surface subsidence rate appear to be increasing. In the fourth stage (Fig. 15d), groundwater exploitation was restricted, and the GWL remained basically stable. In this stage, the pore pressure and hydraulic head of the aquifer were rapidly balanced, with no deformation visible. Due to the poor hydraulic conductivity in the aquitard, hydraulic diffusion persisted, and the aquitard became further compacted. At this time, even though the GWL had stabilized (or risen slightly), the land subsidence continued to persist (the time series for GWL and displacement in Fig. 11 fully verified this point). In the fifth stage (Fig. 15e), the aquifer was replenished and the hydraulic head rose. During this stage, the pore pressure in the aquifer was consistent with the increasing hydraulic head, leading to poroelastic rebound. Meanwhile, in the aquitard, the pore pressure in the lower part was rising, accompanied by poroelastic rebound, while the pore pressure in the upper part was continuously dissipating, which in turn was accompanied by pore compression. As soon as the poroelastic rebound and compression was balanced in the aquifer system, the land subsidence stopped. In the sixth stage (Fig. 15f), the hydraulic head continued to rise. The ground was uplifted when the aquifer system's rebound became greater than the compression.

Furthermore, Section 4.3.2 shows that the delay between surface displacement and GWL in Tianjin is about 0.3–5.5 years, which is significantly smaller than that of previous estimations based on aquifer parameters (Bai et al., 2022; Guo et al., 2017; Guo et al., 2015; Jiang et al., 2018). This is because the equation ignores the restoration capacity of the aquifer system. Specifically, as shown in Fig. 15e, due to lateral or leaking replenishment from adjacent aquifers, the poroelastic rebound in the aquifer and the lower aquitard counteracted the delayed upper compaction of the aquitard, which shortened the time lag between

surface subsidence and GWL. Predictably, as GWL recovered and stabilized, similar to delayed compaction, there will be a delayed rebound in the aquitard. Although Tianjin has not yet reached this stage, this phenomenon has been confirmed in the Santa Clara Valley in the San Francisco Bay Area (Chaussard et al., 2014), in the Phoenix valley (Miller and Shirzaei, 2015), and in the Tucson Valley in southeastern Arizona (Miller et al., 2017).

5.4. Groundwater storage variations in the confined aquifer system

Based on the fact that vertical surface deformation is caused by variations in pore pressure in the aquifer system, the variations in deep groundwater storage (GWS) can be estimated by means of their coupling mechanism. During groundwater exploitation, the water release of an aquifer system consists of water expansion due to the decreasing pore pressure and the compression of the aquifer skeleton due to the increasing effective stress (Castellazzi et al., 2016). In the NCP, the water released due to expansion is two orders of magnitude smaller than the skeleton compression, which can be ignored (Jiang et al., 2018; Shi et al., 2022). As a result, the variation in deep groundwater storage ΔV is approximately equal to the volume of aquifer system compression ΔV_d, while ΔV_d can be estimated by the vertical deformation Δb and the area of the aquifer A, i.e. $\Delta V = \Delta V_d = \Delta b \times A$. The calculation shows that in 2015–2022 (Table 1), the average decrease in deep groundwater volume in Tianjin was -18.3 ± 0.3 mm/yr (equivalent water height). Before the implementation of the GMP, in 2015–2019, the reduction was -24.3 ± 0.2 mm/yr, after which it slowed down significantly to -8.9 ± 0.3 mm/yr in 2019–2022. The statistics for different districts showed similar characteristics. For example, the GWS in the Jinghai area drained at a rate of -52.1 ± 0.3 and -29.3 ± 0.8 mm/yr before and after the GMP, respectively, the same as Wuqing, which showed a rate of -34.7 ± 0.2 and -3.7 ± 0.3 mm/yr. The reduction in GWS depletion indicates that active human intervention has a significant impact on groundwater restoration.

6. Conclusion

In this study, the spatio-temporal development of groundwater level (GWL) and land subsidence in Tianjin was investigated based on field well observation and geodetic data (leveling, GPS, and InSAR). In general, the completion of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project (SNWTP) has enabled Tianjin to be independent in terms of groundwater. In this context, the water source replacement and ecological water replenishment project (known as the Groundwater Management Plan, GMP) implemented in 2018, has greatly reduced groundwater exploitation, restored GWL, mitigated the depletion of groundwater storage (GWS) and decreased the land subsidence rate. The following conclusions were drawn:

1. The GWL of the confined aquifer III, the main exploitation layer in Tianjin, decreased at a rate of 0.6 m/yr and began to rise at a rate of 2.1 m/yr before and after the GMP. Specifically, from January 2018 to December 2021, the average GWL rose by 7.6 m; the cone at a depth >70 m shrunk by 85 %; the hydraulic gradient at the edge of the cone decreased from 2.5 to 4.5 $\times 10^{-3}$ to 1.0–3.0 $\times 10^{-3}$.
2. The deformation field shows that southern Wuqing presented a maximum cumulative settlement of >800 mm between 2014 and 2022, representing a rate of >100 mm/yr. Dynamic results show that, since 2018, the land subsidence area and rate have drastically decreased and slowed down. The area of severe subsidence, with subsidence rates >50 mm/yr, decreased by 99.5 % compared to 2015, while the area with a subsidence rate >20 mm/yr decreased by 88 %. At the same time, the average vertical motion rate decreased from −32.2 mm/yr to −4.5 mm/yr. Since 2020 in particular, Wuqing, Beichen and northern Beichen have undergone poroelastic rebound, with a surface rise of >10 mm/yr observed in local areas.

Table 1
Variation in deep groundwater storage (Equivalent water height).

ID Marked in Fig. 12	County	2015–2019 (mm/yr)	2019–2022 (mm/yr)	2015–2022 (mm/yr)
I	Urban and suburban areas	−28.9 ± 0.4	−6.9 ± 0.4	−19.7 ± 0.5
II	Wuqing	−34.7 ± 0.2	−3.7 ± 0.3	−24.0 ± 0.7
III	Baodi	−7.2 ± 0.2	−4.5 ± 0.3	−6.7 ± 0.1
IV	Ninghe	−18.5 ± 0.1	−5.2 ± 0.3	−13.5 ± 0.3
V	Binhai	−20.4 ± 0.4	−11.2 ± 0.2	−15.2 ± 0.3
VI	Jinghai	−52.1 ± 0.3	−29.3 ± 0.8	−43.9 ± 0.5
Mean	Tianjin	−24.3 ± 0.2	−8.9 ± 0.3	−18.3 ± 0.3

3. Based on comparative analysis, the GWL and vertical deformation show good spatial consistency, indicating that the vertical movement of Tianjin is mainly controlled by the pore pressure of the aquifer system. The time evolutions of specific wells show that the surface deformation lags significantly behind the GWL, with a value between 0.3 and 5.5 years, due to the slow pore pressure dissipation in the aquitard, in which the clay-rich aquifer system showed a long delay.
4. The variation in deep GWS in Tianjin was estimated using the coupling relationship between soil deformation and aquifer pore pressure. Results indicate that the GWS decreased from - 24.3 ± 0.2 mm/yr in 2015–2019 to - 8.9 ± 0.3 mm/yr in 2019–2022 before and after the GMP.

In the future, we will continue to pay attention to the restoration process of the aquifer system in Tianjin. In particular, we will clarify methods for replenishing deep groundwater as well as the deformation law of the aquitard in the context of the rising GWL.

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166803.

CRediT authorship contribution statement

Conceptualization, Guangli Su; Methodology, Chunbao Xiong and Guangli Su; Data Processing and Validation, Guangli Su, Guiying Zhang, Yong Wang, Qiang Shen, and Xiaohu Chen; Writing-Review & Editing, Guangli Su, Chunbao Xiong; Hewen An, and Longchao Qin; Supervision, Chunbao Xiong; Project Administration, Guangli Su; Funding Acquisition, Guangli Su.

Funding

This research was funded by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42204008).

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

Special thanks to Professors Yanqiang Wu and Wei Zhan for their enthusiastic guidance. We also thank our field surveyors for their hard work. The Copernicus Sentinel-1 data were provided by ESA and downloaded from ASF Data Search Vertex (https://search.asf.alaska.edu). The GPS data were collected from CMONOC (Crustal Movement

Observation Network of China). Some figures are plotted using Generic Mapping Tools (GMT) software.

References

Bai, L., Jiang, L., Zhao, Y., Li, Z., Cao, G., Zhao, C., Liu, R., Wang, H., 2022. Quantifying the influence of long-term overexploitation on deep groundwater resources across Cangzhou in the North China Plain using InSAR measurements. J. Hydrol. 605.

Cao, Y., Li, Z., Wei, J., Hu, J., Duan, M., Feng, G., 2017. Stochastic modeling for time series InSAR: with emphasis on atmospheric effects. J. Geod. 92, 185–204.

Castellazzi, P., Martel, R., Rivera, A., Huang, J., Pavlic, G., Calderhead, A.I., Chaussard, E., Garfias, J., Salas, J., 2016. Groundwater depletion in Central Mexico: use of GRACE and InSAR to support water resources management. Water Resour. Res. 52, 5985–6003.

Chaussard, E., Bürgmann, R., Shirzaei, M., Fielding, E.J., Baker, B., 2014. Predictability of hydraulic head changes and characterization of aquifer-system and fault properties from InSAR-derived ground deformation. J. Geophys. Res. Solid Earth 119, 6572–6590.

Chen, C.W., Zebker, H.A., 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 40, 1709–1719.

Chen, C.-T., Hu, J.-C., Lu, C.-Y., Lee, J.-C., Chan, Y.-C., 2007. Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. Eng. Geol. 95, 30–47.

Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., Terpenning, I., 1990. STL: a seasonal-trend decomposition. J. Off. Stat. 6, 3–73.

Du, Z., Ge, L., Ng, A.H.-M., Lian, X., Zhu, Q., Horgan, F.G., Zhang, Q., 2021. Analysis of the impact of the South-to-North water diversion project on water balance and land subsidence in Beijing, China between 2007 and 2020. J. Hydrol. 603.

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., 2007. The shuttle radar topography mission. Rev. Geophys. 45.

Fei, Y., Miao, J., Zhang, Z., Chen, Z., Song, H., Yang, M., 2009. Analysis on evolution of groundwater depression cones and its leading factors in North China Plain. Resour. Sci 31, 394–399 (In Chinese with English abstract).

Feng, W., Zhong, M., Lemoine, J.-M., Biancale, R., Hsu, H.-T., Xia, J., 2013. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. Water Resour. Res. 49, 2110–2118.

Feng, W., Shum, C., Zhong, M., Pan, Y., 2018. Groundwater storage changes in China from satellite gravity: an overview. Remote Sens. (Basel) 10.

Gong, H., Pan, Y., Zheng, L., Li, X., Zhu, L., Zhang, C., Huang, Z., Li, Z., Wang, H., Zhou, C., 2018. Long-term groundwater storage changes and land subsidence development in the North China Plain (1971–2015). Hydrgeol. J. 26, 1417–1427.

Guo, H., Zhang, Z., Cheng, G., Li, W., Li, T., Jiao, J.J., 2015. Groundwater-derived land subsidence in the North China Plain. Environ. Earth Sci. 74, 1415–1427.

Guo, H., Bai, J., Zhang, Y., Wang, L., Shi, J., Wenpeng, L.I., Zhang, Z., Wang, Y., Zhu, J., Wang, H., 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain. Geol. China 44, 1115–1127 (In Chinese with English abstract).

Guo, C., Nie, J., Tian, J., Wang, W., Cheng, C., Wang, B., Yin, H., Zhang, H., 2019. Vertical ground displacements in the Shandong Province derived from long-term GNSS and leveling surveying. Adv. Space Res. 64, 1388–1397.

Guo, H., Li, W., Wang, L., Chen, Y., Zang, X., Wang, Y., Zhu, J., Bian, Y., 2021. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain. Hydrogeol. Eng. Geol. 48, 162–171 (In Chinese with English abstract).

Ha, D., Zheng, G., Loáiciga, H.A., Guo, W., Zhou, H., Chai, J., 2020. Long-term groundwater level changes and land subsidence in Tianjin, China. Acta Geotech. 16, 1303–1314.

Herrera-Garcia, G., Ezquerro, P., Tomas, R., Bejar-Pizarro, M., Lopez-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R.M., Carreon-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W.C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., Ye, S., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. Science 371, 34–36.

Herring, T., King, R., Floyd, M., Mcclusky, S., 2018a. GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT (Release 10.7), Department of Earth, Atmosphere, and Planetary Sciences Massachusetts Institute Technology.

Herring, T., King, R., Floyd, M., Mcclusky, S., 2018b. GLOBK Reference Manual. Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program (Release 10.7). Department of Earth, Atmosphere, and Planetary Sciences Massachusetts Institute Technology.

Hoffmann, J., Galloway, D.L., Zebker, H.A., 2003. Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. Water Resour. Res. 39, 1–12.

Hu, X., Bürgmann, R., 2020. Aquifer deformation and active faulting in Salt Lake Valley, Utah, USA. Earth Planet. Sci. Lett. 547.

Jia, L., He, T., Weilong, R., Lan, Z., Wenke, S., 2020. Influence of South-to-North water transfer project on the changes of terrestrial water storage in North China Plain. J. Univ. Chin. Acad. Sci. 37, 775 (In Chinese with English abstract).

Jiang, L., Bai, L., Zhao, Y., Cao, G., Wang, H., Sun, Q., 2018. Combining InSAR and hydraulic head measurements to estimate aquifer parameters and storage variations of confined aquifer system in Cangzhou, North China Plain. Water Resour. Res. 54, 8234–8252.

Jiang, Z., Hsu, Y.-J., Yuan, L., Huang, D., 2021. Monitoring time-varying terrestrial water storage changes using daily GNSS measurements in Yunnan, southwest China. Remote Sens. Environ. 254.

Klein, E., Bock, Y., Xu, X., Sandwell, D.T., Golriz, D., Fang, P., Su, L., 2019. Transient deformation in California from two decades of GPS displacements: implications for a three-dimensional kinematic reference frame. J. Geophys. Res. Solid Earth 124, 12189–12223.

Lei, K., Ma, F., Chen, B., Luo, Y., Cui, W., Zhao, L., Wang, X., Sun, A., 2022. Effects of south-to-north water diversion project on groundwater and land subsidence in Beijing, China. Bull. Eng. Geol. Environ. 82.

Li, H., Dong, X., Zhang, W., 2022a. Evaluation of groundwater over-exploitation area and analysis of comprehensive treatment effect in Tianjin. Haihe Water Resources 32–35 (In Chinese with English abstract).

Li, M., Sun, J., Xue, L., Shen, Z., Zhao, B., Hu, L., 2022b. Characterization of Aquifer System and Groundwater Storage Change Due to South-to-North Water Diversion Project at Huairou Groundwater Reserve Site, Beijing, China, Using Geodetic and Hydrological Data. Remote Sensing, p. 14.

Li, Z., Duan, M., Cao, Y., Mu, M., He, X., Wei, J., 2022c. Mitigation of time-series InSAR turbulent atmospheric phase noise: a review. Geodesy Geodyn. 13, 93–103.

Li, Z., Zhu, W., Yu, C., Zhang, Q., Zhang, C., Liu, Z., Zhang, X., Chen, B., Du, J., Song, C., 2022d. Interferometric synthetic aperture radar for deformation mapping: opportunities, challenges and the outlook. Acta Geodaet. Cartographica Sin. 51, 1485 (In Chinese with English abstract).

Liang, H., Zhan, W., Li, J., Zhu, S., 2022. Terrestrial reference frame SC20 for monitoring crustal deformation in the adjacent areas of the South China block. Geophys. J. Int. 229, 426–438.

Liu, P., Li, Q., Li, Z., Hoey, T., Liu, G., Wang, C., Hu, Z., Zhou, Z., Singleton, A., 2016. Anatomy of subsidence in Tianjin from time series InSAR. Remote Sens. (Basel) 8.

Liu, J., Jiang, L., Zhang, X., Druce, D., Kittel, C.M.M., Tøttrup, C., Bauer-Gottwein, P., 2021. Impacts of water resources management on land water storage in the North China Plain: insights from multi-mission earth observations. J. Hydrol. 603.

Long, D., Yang, W., Scanlon, B.R., Zhao, J., Liu, D., Burek, P., Pan, Y., You, L., Wada, Y., 2020. South-to-North water diversion stabilizing Beijing's groundwater levels. Nat. Commun. 11, 3665.

Miller, M.M., Shirzaei, M., 2015. Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift in Phoenix using InSAR time series and wavelet transforms. J. Geophys. Res. Solid Earth 120, 5822–5842.

Miller, M.M., Shirzaei, M., Argus, D., 2017. Aquifer mechanical properties and decelerated compaction in Tucson, Arizona. J. Geophys. Res. Solid Earth 122, 8402–8416.

Neely, W.R., Borsa, A.A., Silverii, F., 2020. GInSAR: a cGPS correction for enhanced InSAR time series. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 58, 136–146.

Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., Wessel, P., 2011. Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation. Wiley Online Library.

Shi, J.-s., Li, G.-m., Liang, X., Chen, Z.-y., Shao, J.-l., Song, X.-f., 2014. Evolution mechanism and control of groundwater in the North China Plain. Acta Geosci. Sin. 527–534 (In Chinese with English abstract).

Shi, X., Zhu, T., Tang, W., Jiang, M., Jiang, H., Yang, C., Zhan, W., Ming, Z., Zhang, S., 2022. Inferring decelerated land subsidence and groundwater storage dynamics in Tianjin–Langfang using Sentinel-1 InSAR. Int. J. Digit. Earth 15, 1526–1546.

Su, G., Wu, Y., Zhan, W., Zheng, Z., Chang, L., Wang, J., 2021. Spatiotemporal evolution characteristics of land subsidence caused by groundwater depletion in the North China plain during the past six decades. J. Hydrol. 600.

TJWA, T.M.W.A., 2021. Tianjin Water Resources Bulletin.

Tong, X., Schmidt, D., 2016. Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. Remote Sens. Environ. 186, 405–415.

Tymofyeyeva, E., Fialko, Y., 2015. Mitigation of atmospheric phase delays in InSAR data, with application to the eastern California shear zone. J. Geophys. Res. Solid Earth 120, 5952–5963.

Wang, D., Zhao, B., Li, Y., Yu, J., Chen, Y., Zhou, X., 2022. Determination of tectonic and nontectonic vertical motion rates of the North China Craton using dense GPS and GRACE data. J. Asian Earth Sci. 236.

Wessel, P., Smith, W.H., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F., 2013. Generic mapping tools: improved version released. Eos, Trans. Am. Geophys. Union 94, 409–410 (In Chinese with English abstract).

Wu, Y., Jiang, Z., Liu, X., Wei, W., Zhu, S., Zhang, L., Zou, Z., Xiong, X., Wang, Q., Du, J., 2016. A comprehensive study of gridding methods for GPS horizontal velocity fields. Pure Appl. Geophys. 174, 1201–1217.

Wu, Y., Jiang, Z., Guo, B., Yang, G., Bo, W., Chang, L., Li, L., Zhu, S., Zhan, W., Zheng, Z., Liang, H., 2021. Joint adjustment for large-area, multi-source vertical data: method, validation and application. Acta Geod. Geophys. 56, 113–131.

Wu, Y., Zheng, Z., Nie, J., Chang, L., Su, G., Yin, H., Liang, H., Pang, Y., Chen, C., Jiang, Z., Bo, W., 2022. High-precision vertical movement and three-dimensional deformation pattern of the Tibetan Plateau. J. Geophys. Res. Solid Earth 127.

Xu, F., 2002. Analysis of cause of the three severe storm surge disasters in tianjin and strategy of disaster prevention. Mar. Forecasts 19, 36–42 (In Chinese with English abstract).

Xu, X., Sandwell, D.T., Tymofyeyeva, E., Gonzalez-Ortega, A., Tong, X., 2017. Tectonic and anthropogenic deformation at the Cerro Prieto geothermal step-over revealed by sentinel-1A InSAR. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 55, 5284–5292.

Xu, X., Sandwell, D.T., Klein, E., Bock, Y., 2021. Integrated Sentinel-1 InSAR and GNSS time-series along the San Andreas fault system. J. Geophys. Res. Solid Earth 126.

Yang, J., 2005. Study on Countermeasures and Strategies of Land Subsidence Control in Tianjin. In (pp. 8-11).

Yang, H., Cao, W., Zhi, C., Li, Z., Bao, X., Ren, Y., Liu, F., Fan, C., Wang, S., Wang, Y., 2021. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment. Geol. China 48, 1142–1155 (In Chinese with English abstract).
Yang, W., Long, D., Scanlon, B.R., Burek, P., Zhang, C., Han, Z., Butler, J.J., Pan, Y., Lei, X., Wada, Y., 2022. Human intervention will stabilize groundwater storage across the North China Plain. Water Resour. Res. 58.
Zhan, W., Li, F., Hao, W., Yan, J., 2017. Regional characteristics and influencing factors of seasonal vertical crustal motions in Yunnan, China. Geophys. J. Int. 210, 1295–1304.
Zhang, Y., Wu, H.A., Kang, Y., Zhu, C., 2016. Ground subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1992 to 2014 revealed by multiple SAR stacks. Remote Sens. (Basel) 8.
Zhang, T., Shen, W.-B., Wu, W., Zhang, B., Pan, Y., 2019. Recent surface deformation in the Tianjin area revealed by sentinel-1A data. Remote Sens. (Basel) 11.
Zhang, C., Duan, Q., Yeh, P.J.F., Pan, Y., Gong, H., Gong, W., Di, Z., Lei, X., Liao, W., Huang, Z., Zheng, L., Guo, X., 2020. The effectiveness of the south-to-north water diversion middle route project on water delivery and groundwater recovery in North China Plain. Water Resour. Res. 56.
Zhang, C., Duan, Q., Yeh, P., J.-F., Pan, Y., Gong, H., Moradkhani, H., Gong, W., Lei, X., Liao, W., Xu, L., Huang, Z., Zheng, L., Guo, X., 2021. Sub-regional groundwater storage recovery in North China Plain after the South-to-North water diversion project. J. Hydrol. 597.
Zhang, X., Chen, B., Gong, H., Lei, K., Zhou, C., Lu, Z., Zhao, D., 2022. Inversion of groundwater storage variations considering lag effect in Beijing Plain, from RadarSat-2 with SBAS-InSAR technology. Remote Sens. (Basel) 14.
Zhou, C., Lan, H., Gong, H., Zhang, Y., Warner, T.A., Clague, J.J., Wu, Y., 2019. Reduced rate of land subsidence since 2016 in Beijing, China: evidence from Tomo-PSInSAR using RadarSAT-2 and Sentinel-1 datasets. Int. J. Remote Sens. 41, 1259–1285.
Zhu, J., Wang, Z., Hou, T., Li, Y., 2022. Evolution of groundwater dynamic under the influence of treatment of groundwater overexploitation in the Beijing-Tianjin-Hebe Plain. J. China Hydrol. 42, 1–5 (In Chinese with English abstract).

remote sensing

MDPI

Article

Surface Uplift Induced by Groundwater Level Variations Revealed Using MT-InSAR Time-Series Observations

Seongcheon Park [1], Sang-Hoon Hong [1,*] and Francesca Cigna [2]

[1] Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; parksc@pusan.ac.kr
[2] Institute of Atmospheric Sciences and Climate (ISAC), National Research Council (CNR), Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Rome, Italy; f.cigna@isac.cnr.it
* Correspondence: geoshong@pusan.ac.kr

Highlights

What are the main findings?

- MT-InSAR results using multi-frequency SAR datasets reveal total surface uplift of approximately 9.2 cm in Gimhae City, South Korea.
- The spatiotemporal features of deformation are strongly related to hydrogeological factors, indicating that groundwater level rise induced surface uplift.

What are the implications of the main findings?

- Analyzing deformation patterns by combining MT-InSAR with hydrogeological data enables the effective inference of subsurface processes.
- A long-term rise in the groundwater level can trigger sustained deformation, with residual displacement persisting even after the groundwater level has stabilized.

Abstract

By altering aquifer storage capacity, groundwater level (GWL) plays a critical role in driving surface deformation, including ground subsidence and uplift. Groundwater depletion can induce sinkholes or subsidence, whereas recharge can cause surface uplift. These processes pose significant risks to soft grounds composed of soft alluvial sediments, emphasizing the importance of regular monitoring. In this study, we applied the small baseline subset (SBAS) technique to conduct a time-series analysis of surface deformation in Gimhae City, South Korea, where a continuous GWL increase was observed. Seasonal trend decomposition using the Loess (STL) method was employed to isolate the long-term GWL trend by removing seasonal variability. Multi-frequency synthetic aperture radar datasets, including ALOS PALSAR, COSMO-SkyMed, and Sentinel-1, revealed a cumulative surface uplift of approximately 9.2 cm, primarily concentrated along the deepest GWL contour line and confined between two lineament structures. The decomposed velocities from Sentinel-1 highlighted the predominance of vertical displacement over horizontal movement. Time-series analyses consistently showed uplift patterns, whereas correlation analysis demonstrated a strong relationship ($R^2 > 0.75$) between surface deformation and GWL changes from 2013 to 2021. These results suggest a significant link between surface uplift and the rising GWL in Gimhae City, providing insights into the hydrogeological processes that influence ground deformation. Furthermore, a time lag between the GWL changes and surface displacement was identified, providing valuable insights into the dynamics of groundwater-related surface deformation.

check for updates

Academic Editor: Teng Wang

Received: 22 October 2025
Revised: 20 November 2025
Accepted: 27 November 2025
Published: 29 November 2025

Citation: Park, S.; Hong, S.-H.; Cigna, F. Surface Uplift Induced by Groundwater Level Variations Revealed Using MT-InSAR Time-Series Observations. *Remote Sens.* **2025**, *17*, 3875. https://doi.org/10.3390/rs17233875

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Keywords: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); small baseline subset (SBAS); surface deformation; groundwater fluctuation; hydrogeology

1. Introduction

Groundwater level (GWL), also referred to as the water table or hydraulic head, is a critical parameter for assessing groundwater presence and storage within an aquifer [1]. Natural factors, such as seasonal precipitation, and anthropogenic activities, including artificial injection and groundwater extraction, influence GWL fluctuations. These fluctuations are not confined to the subsurface and have significant implications for surface deformation (Figure 1). Particularly, variations in the GWL induce volume changes in aquifer systems that manifest as surface deformations [2,3]. Groundwater depletion results in a reduction in pore pressure, leading to land subsidence caused by a decrease in the ability of an aquifer to support the overlying load [4,5]. This phenomenon has been reported globally, prompting numerous studies aimed at mitigating its impacts [6–9]. Conversely, an increase in the GWL through natural recharge or artificial fluid injection expands the aquifer volume, potentially resulting in surface uplift [10–13]. These processes highlight the complex relationship between subsurface hydrodynamics and surface deformation, underscoring the importance of understanding GWL variation. Such knowledge is essential for developing effective groundwater management strategies to mitigate environmental risks and promote sustainable water use.

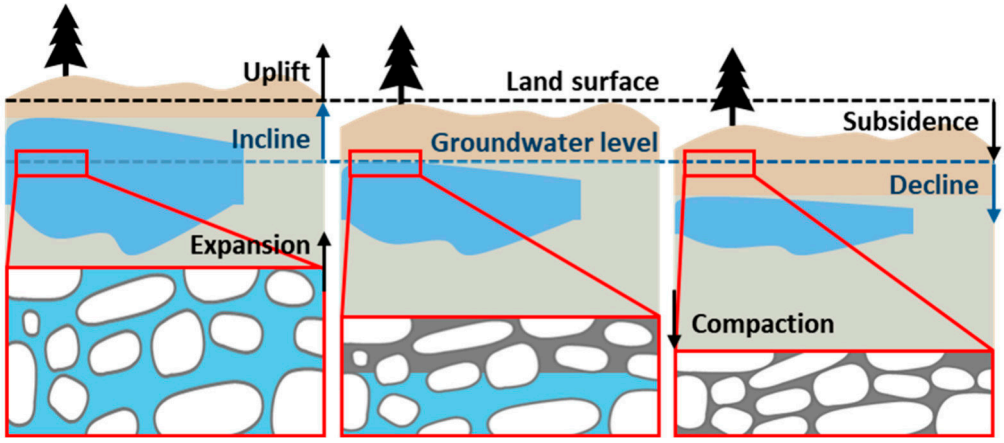


Figure 1. Schematic illustration of surface deformation caused by groundwater changes.

Terrestrial geodetic surveys, often combined with traditional hydrogeological techniques, such as electrical resistivity or in situ measurements, have been widely employed to investigate surface deformation caused by groundwater depletion or recharge [14–16]. Although these methods allow for high-accuracy measurements with high temporal resolution, their application is constrained by their low spatial resolution, which limits their effectiveness in capturing detailed spatial patterns of deformation. By contrast, differential interferometric synthetic aperture radar (DInSAR) offers a robust solution for measuring surface displacement with a high spatial resolution and precision ranging from centimeters to millimeters [17]. The ability of DInSAR to detect surface deformation caused by hydrological processes provides a valuable complement to GWL data, enabling the quantification of aquifer properties and improving our understanding of subsurface dynamics [18,19]. To further extend the capabilities of DInSAR, advanced multi-temporal interferometric SAR (MT-InSAR) techniques such as the small baseline subset (SBAS) and persistent scatterer interferometry (PSI) have been developed. These algorithms allow the observation of

long-term deformation and have been successfully applied to measure surface displacement with high temporal and spatial resolution [20,21]. Time-series analyses based on MT-InSAR have been extensively used in studies investigating surface deformation related to earthquakes, volcanic activity, subsidence, landslides, and groundwater [22–26]. In particular, severe deformation of groundwater can be induced by anthropogenic activities, leading to various hazards such as sinkholes and land subsidence, thereby highlighting the necessity of MT-InSAR observations [27,28]. Both subsidence and uplift phenomena have been monitored continuously over long periods through the accumulation of satellite observations. Based on these long-term datasets, ongoing studies have focused on integrating the modeling of surface deformation induced by groundwater dynamics and estimating correlations or time-delay effects between aquifer response and surface displacement [29–32]. Moreover, MT-InSAR has been increasingly combined with machine learning in various studies to enhance disaster prediction [33,34]. Integrating advanced remote sensing with traditional hydrogeological methods enhances our understanding of surface deformation and subsurface hydrological interactions, which are essential for addressing groundwater management and land stability challenges in regions affected by hydrological change.

In this study, we applied the SBAS time-series algorithm to Gimhae City, Republic of Korea, where the GWLs have steadily increased. Although previous studies have demonstrated the effectiveness of comparing GWL variations with InSAR-derived deformation, most have focused on subsidence caused by groundwater extraction. By contrast, uplift associated with groundwater recharge is significantly rare and has rarely been reported in South Korea. Our study investigated a localized area exhibiting long-term uplift that had not previously been recognized as susceptible to groundwater-induced surface deformation. To enable the effective interpretation and capture of long-term deformation, we utilized multi-frequency SAR datasets composed of L-, C-, and X-band observations. A signal decomposition method was applied to remove seasonal effects and isolate the long-term variability. Spatiotemporal analyses were conducted using hydrogeological data to investigate the relationship between the deformation and groundwater variation. This approach provides new insights into the mechanisms driving surface deformation, enhancing our understanding of regional hydrogeological processes and supporting strategies for sustainable groundwater management and urban resilience in geologically complex environments. Therefore, the primary aim of this study is to investigate the long-term deformation associated with GWL variations in Gimhae City by integrating multi-frequency InSAR datasets with hydrological observations.

2. Study Area and Datasets

2.1. Study Area

We analyzed the time-series surface deformation within the central urban area of Gimhae City, South Korea, using the SBAS algorithm (Figure 2). Situated in the upper part of the Nakdong River Basin, the study area is underlain by extensive alluvial deposits composed of unconsolidated Quaternary sediments (Figure 2c). According to the hydrogeological map, a widespread aquifer system is present beneath the urbanized area (Figure 2b,c), characterized by high porosity and intergranular flow, suggesting favorable conditions for groundwater storage and movement. These hydrogeological characteristics indicate that Gimhae City is underlain by soft, unconsolidated sediments and is highly sensitive to variations in the GWL. However, detailed subsurface information, such as aquifer depth and thickness of unconsolidated sediments, is not publicly available for the study area; therefore, our interpretation is based on surface geology and groundwater level observations.

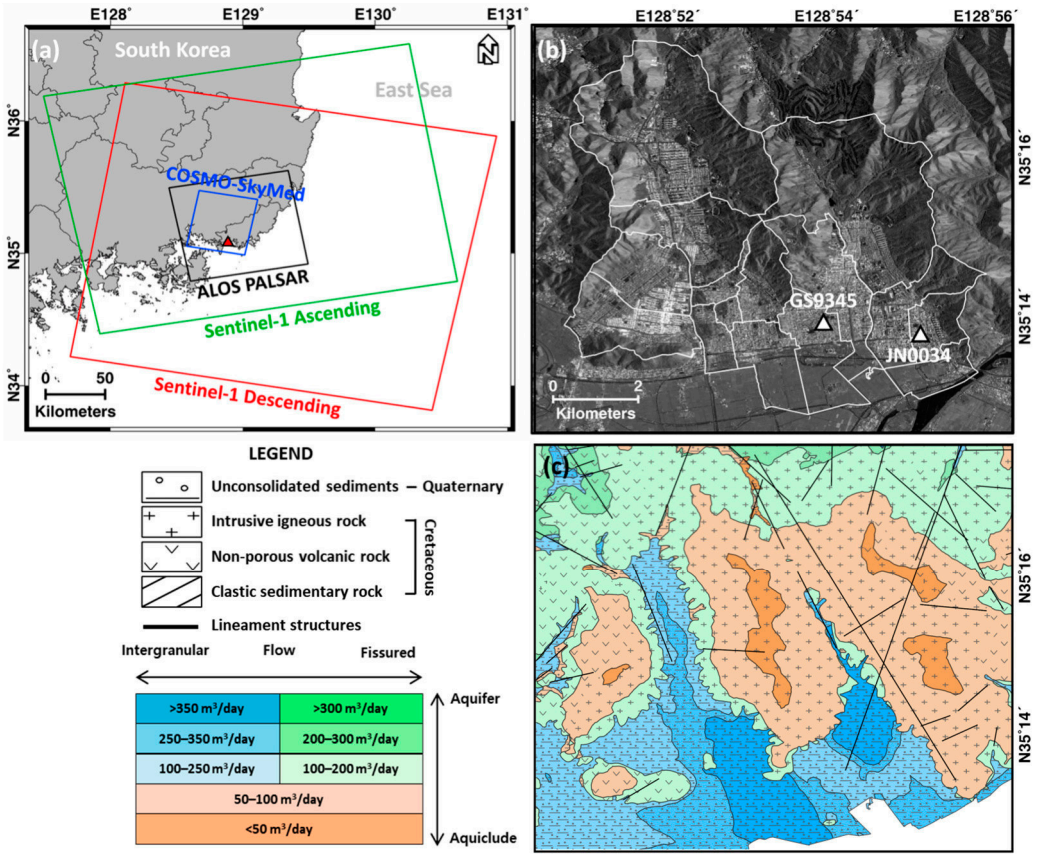


Figure 2. (**a**) Swaths of SAR datasets were utilized in this study. ALOS PALSAR and COSMO-SkyMed SAR data are shown by the black and blue rectangles, whereas Sentinel-1 descending and ascending tracks are depicted by the red and green rectangles. The location of the study area is marked with a red triangle. (**b**) Average amplitude image of the study area derived from COSMO-SkyMed data. The two groundwater monitoring stations are marked with white triangles, and the weather station, where precipitation data was collected, is located at the same site as GS9345. A white line outlines the administrative boundary of Gimhae City. (**c**) Hydrogeological map of Gimhae City showing major geological features and the distribution of the aquifer system. The black solid lines denote the identified lineament structures.

Gimhae City has undergone rapid urban development in recent decades. Originally dominated by agricultural land, the area transformed into an industrial complex between the late 1980s and the early 1990s. In recent years, many of these industrial facilities have ceased operation, leading to a mixed industrial–residential landscape with ongoing development plans. Such rapid and large-scale land-use changes can alter both the purpose and volume of groundwater, resulting in fluctuations in the GWLs. Daily GWL measurements from the monitoring stations at Gimhae Samjeong (GS9345) and Jinae (JN0034), located within the study area, revealed a continuous long-term increase in GWL (Figure 3). The underlying cause of the continuous increase in the GWL in this area has not been identified through field investigations and warrants further study for effective groundwater management. Nonetheless, a long-term increase in the GWL has been observed since the installation of the monitoring stations. The most plausible explanation for the increase in GWL is a shift in groundwater usage patterns, potentially due to enhanced recharge or reduced extraction [35]. Although seasonal variations in natural rainfall typically manifest over short periods, ranging from days to weeks [36], the observed GWL trend represents a persistent and long-term hydrological shift. These long-term fluctuations can induce sustained surface deformation in soft ground environments, highlighting the need for a systematic investigation from an urban risk management perspective. Therefore, in this

study, we aimed to monitor the long-term deformation time series in the study area and evaluate its relationship with GWL variations.

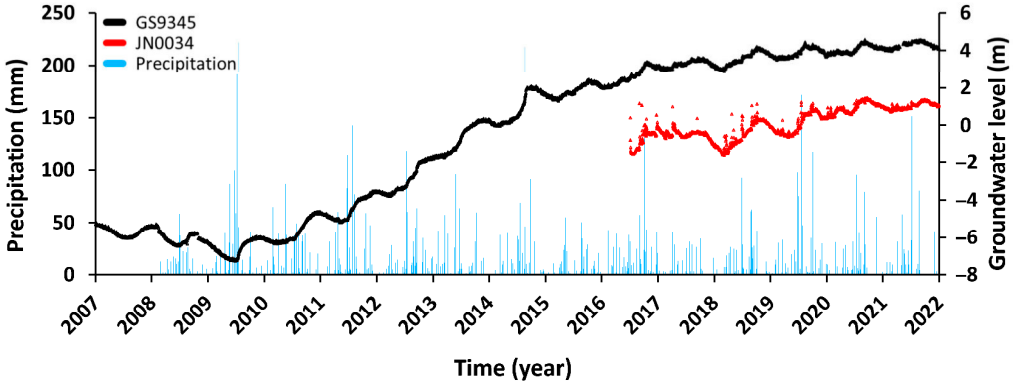


Figure 3. Time-series graph of groundwater level (GWL) measurements and precipitation. Cyan bars represent precipitation data recorded between 25 February 2008 and 16 December 2021. Daily GWL data from station GS9345 (1 January 2007 to 31 December 2021) are black dots, whereas red dots indicate GWL data from station JN0034 (4 July 2016 to 31 December 2021).

2.2. Hydrogeological Datasets

We utilized daily average GWL data measured at the Gimhae Samjeong monitoring station (GS9345) from 1 January 2007 to 31 December 2021, operated by the Ministry of Environment and the Korea Water Resources Corporation (K-water). Additionally, GWL data from the Gimhae Jinae monitoring station (JN0034), collected from 4 July 2016 to 31 December 2021, and operated by the local municipality, were also used. The GS9345 station is located at a depth of 70 m within the confined aquifer, whereas the JN0034 station is located at a depth of 20 m within the unconfined aquifer. The hydraulic conductivity, which indicates the permeability of aquifer materials to fluid flow, was measured as 4.93×10^{-4} cm/s at GS9345 through an experiment conducted in 1995, whereas it was not provided for JN0034. In addition, no two-dimensional (2D) hydraulic conductivity map is available for the study area. These datasets were obtained from the National Groundwater Information Management and Service Center (GIMS). Both GWL datasets exhibited a seasonal component with a recurring annual cycle, which was closely aligned with the precipitation data from the Korea Meteorological Administration (Figure 3). This cyclical pattern may reflect the influence of seasonal rainfall on GWLs. Hydrogeological map data, including the GWL contour map and flow directions, were collected from GIMS to analyze the spatial characteristics of the surface deformation. The Ministry of Land, Infrastructure, and Transport and K-water initially investigated these maps from January 2004 to December 2005. The Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources provided information on the locations of the two lineament structures incorporated into the analysis [37]. These additional data facilitate a comprehensive understanding of the hydrogeological and structural factors influencing surface deformation.

2.3. Multi-Frequency Synthetic Aperture Radar

We collected four SAR datasets comprising X-, C-, and L-band data to observe long-term surface deformation and examine its relationship with groundwater fluctuations. The datasets were carefully selected to provide the optimal temporal and spatial coverage of the study area. For the X-band, we employed 184 COSMO-SkyMed descending HIIMAGE single-look complex (SLC) images obtained from 9 January 2013 to 20 April 2019. We analyzed C-band data from Sentinel-1 satellites, including 164 descending interferometric wide (IW) mode SLC images collected between 8 January 2016 and 14 October 2021, and 141 ascending IW mode SLC images acquired between 20 January 2016 and 8 October 2021.

In addition, we utilized 19 ALOS PALSAR ascending L0 raw images acquired from 15 September 2007 to 24 December 2010. The incidence angles of the datasets ranged from 32.2° to 41.7°, ensuring compatibility with the surface deformation analysis. Table 1 provides further technical details of each dataset. These SAR datasets offer diverse wavelengths and acquisition geometries, enabling a robust comparison of surface deformation patterns and their correlations with GWL fluctuations over different periods and observation modes.

Table 1. List of multi-frequency SAR datasets utilized in this study.

Satellite	ALOS PALSAR	COSMO-SkyMed	Sentinel-1	Sentinel-1
Track	426	4	61	54
Orbit direction	Ascending	Descending	Descending	Ascending
Acquisition period	15 September 2007 –24 December 2010	9 January 2013 –20 April 2019	8 January 2016 –14 October 2021	20 January 2016 –8 October 2021
Wavelength	L-band (23.8 cm)	X-band (3.1 cm)	C-band (5.6 cm)	C-band (5.6 cm)
Incidence angle	38.79°	32.25°	41.63°	39.18°
Range pixel spacing	4.68 m	1.14 m	2.33 m	2.33 m
Azimuth pixel spacing	3.15 m	1.92 m	13.94 m	13.94 m
Number of images	19	184	164	141

3. Methodology

3.1. Seasonal Trend Decomposition

To distinguish between seasonal and long-term factors contributing to the observed GWL increase at the monitoring stations, we applied seasonal trend decomposition using the Loess (STL) method to the time-series data. This approach allowed for a clear interpretation of the primary drivers of surface deformation. Monthly averaged GWL data were used, with the seasonal cycle set to 1 year to account for rainfall effects. In addition to anthropogenic factors, rainfall is the most influential natural factor affecting the GWL variation. Owing to the climatic characteristics of the study area, precipitation exhibits a distinct annual cycle, as shown in Figure 3. Therefore, a 1-year window was selected for STL decomposition to remove seasonal variations. STL is a widely used technique for time-series analysis, owing to its conceptual simplicity and flexibility in handling various data patterns. It decomposes time-series data into three components: trend, seasonal, and residual, using a locally estimated scatter plot smoother (Loess) regression function [38]. This method allowed us to isolate the long-term rising trend from seasonal fluctuations, enabling a focus on the groundwater recharge patterns potentially influenced by anthropogenic or climatic factors.

3.2. MT-InSAR Processing

We conducted a time-series analysis using the SBAS algorithm implemented using GAMMA software (20241205) [20,39]. SBAS is a multi-temporal InSAR method that utilizes interferogram pairs with small spatial and temporal baselines to maintain high coherence and minimize decorrelation caused by large baselines. This approach was particularly practical for long-term deformation studies, and the overall workflow for data processing and analysis used in this study is shown in Figure 4. For co-registration, the first acquisition date from each dataset was selected as the reference image. Interferogram networks were generated using sensor-specific maximum perpendicular and temporal baselines tailored to the wavelength and spatial resolution of each SAR platform. Network connectivity between interferogram pairs was ensured, and baseline thresholds were selected to remain

within the critical baseline. The temporal baseline included interferogram pairs spanning up to 1 year to capture long-term deformation. Owing to its longer wavelength, the L-band ALOS PALSAR data maintained high coherence, even with a large baseline. By contrast, the X-band COSMO-SkyMed data achieved highly coherent interferograms owing to their high spatial resolution despite having shorter wavelengths than the L- and C-band data [40,41].

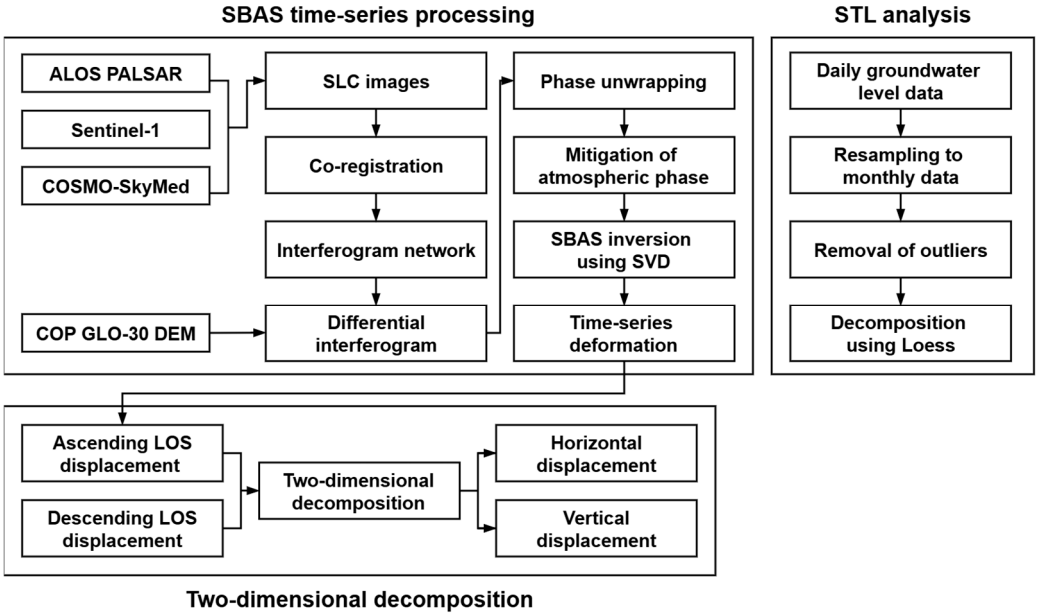


Figure 4. Workflow illustrating the entire sequence of data processing.

Differential interferograms were generated by removing the topographic phase using the Copernicus GLO-30 digital elevation model (DEM) [42]. Multi-looking processing and adaptive phase filtering were used to suppress phase noise [43]. Based on the pixel spacing of each SAR sensor, the multi-looking factors were set to 4 × 12, 4 × 4, and 10 × 2 in range and azimuth for ALOS PALSAR, COSMO-SkyMed, and Sentinel-1, respectively. To reduce phase biases in individual interferogram pairs, an average coherence threshold was applied, and low-quality interferograms were excluded from processing. A minimum cost flow algorithm was employed for phase unwrapping, and the consistency of the unwrapped phases was assessed and corrected using a simulated unwrapped phase model [44,45]. The residual orbital errors were adjusted and removed by applying a polynomial model to the linear phase ramp. Atmospheric phase delays, randomly distributed in both spatial and temporal domains, were mitigated using spatial filtering and temporal smoothing factors [46]. The unwrapped differential interferograms were converted into line-of-sight (LOS) time-series displacements using the singular value decomposition (SVD) and least squares (LS) methods [20]. A reference point with a consistently high coherence across all interferograms, which was assumed to be deformation-free, was selected for each dataset [47]. The final time-series SBAS results were geocoded using the DEM and masked using coherence and standard deviation thresholds.

To obtain the horizontal and vertical deformations, we decomposed the LOS displacements from the ascending and descending orbits into 2D components (east–west and vertical) [48]. This decomposition, performed under the assumption of negligible north–south deformation, uses the incidence angle (θ) and heading angle (α) for each orbit, as expressed in Equation (1) [49].

$$\begin{pmatrix} D_{asc} \\ D_{desc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -sin\theta_{asc}cos\alpha_{asc} & cos\theta_{asc} \\ -sin\theta_{desc}cos\alpha_{desc} & cos\theta_{desc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{east-west} \\ D_{up-down} \end{pmatrix} \quad (1)$$

This approach overcomes the limitations of LOS observations imposed by the satellite geometry, enabling multifaceted analyses and facilitating their application across a wide range of studies [50,51]. Based on the decomposed results, all LOS displacements were projected in the vertical direction using Equation (2) and the respective incidence angle, as the deformation associated with groundwater fluctuations primarily manifests as vertical movement.

$$D_{up-down} = \frac{D_{LOS}}{COS\theta} \quad (2)$$

4. Results

4.1. MT-InSAR Observations

We generated four deformation velocity maps in the LOS direction (Figure 5a–d) and two decomposed velocity maps in the horizontal (east–west) and vertical (up–down) directions (Figure 6a,b). Although GNSS data were unavailable, making direct validation of each dataset difficult, both the COSMO-SkyMed and Sentinel-1 results showed uplift signals in spatially similar regions. However, no clear changes were observed in GWL during the ALOS PALSAR observation period; consequently, no significant surface displacement was detected. Therefore, this study places more emphasis on interpreting surface deformation during the period of GWL increase.

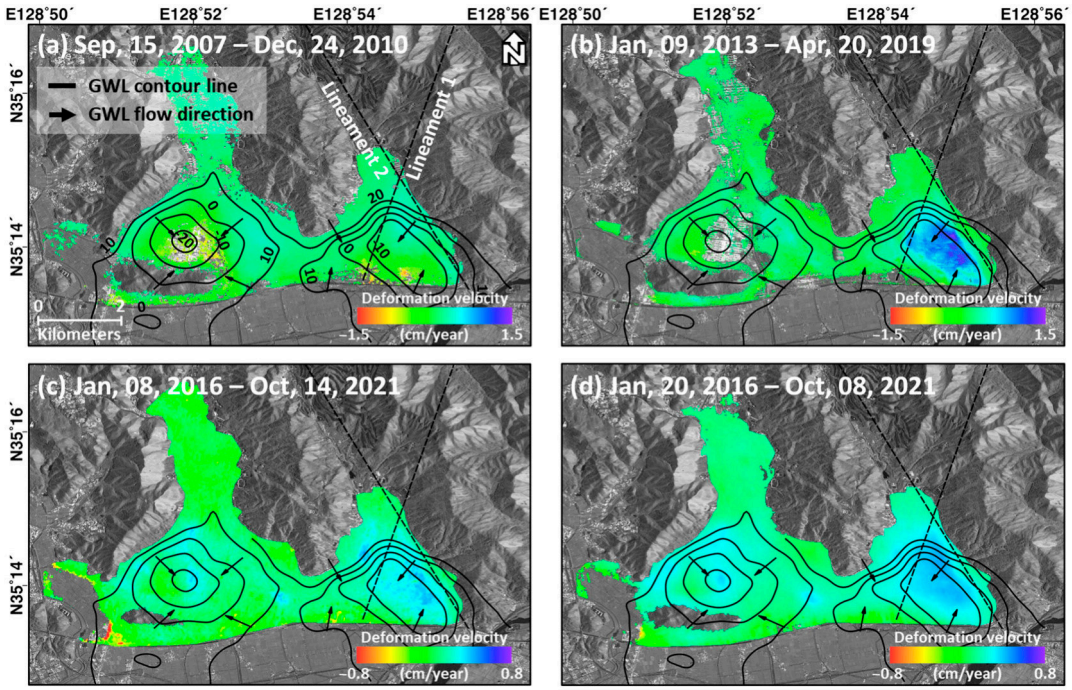


Figure 5. Deformation velocity maps in the line-of-sight (LOS) direction were generated as follows: (**a**) from L-band ALOS PALSAR data, (**b**) from X-band COSMO-SkyMed, and (**c**,**d**) from C-band Sentinel-1 data in descending and ascending orbits. The GWL contour lines are black solid lines, and the lineament structures are black dotted. The black arrow in (**a**) indicates the flow directions of groundwater.

To assess the reliability of the MT-InSAR results, we generated standard deviation maps of the residual phase to estimate velocity uncertainty. If significant uncertainty or phase bias is present, the time-series deformation exhibits spatially and temporally incoherent patterns, resulting in high standard deviation and low coherence values. However, the standard deviation maps derived from all SAR datasets showed values converging toward zero, including within the uplift region (Figure S1 in Supplementary Materials). This confirms the stability of the interferometric phase and supports the reliability of time-series

processing. Scatter plots illustrating the relationship between coherence and standard deviation for the study area (Figure 5) were generated to further validate the MT-InSAR results (Figure S2 of the Supplementary Materials). Although the standard deviation associated with the ALOS PALSAR dataset was slightly higher than that of the other datasets, all mean standard deviation values remained below 0.35 cm, and the mean coherence values exceeded 0.85, indicating sufficient analysis reliability. In all the figures, the eastward and downward movements are displayed in red with negative values, whereas the westward and upward movements are shown in blue with positive values.

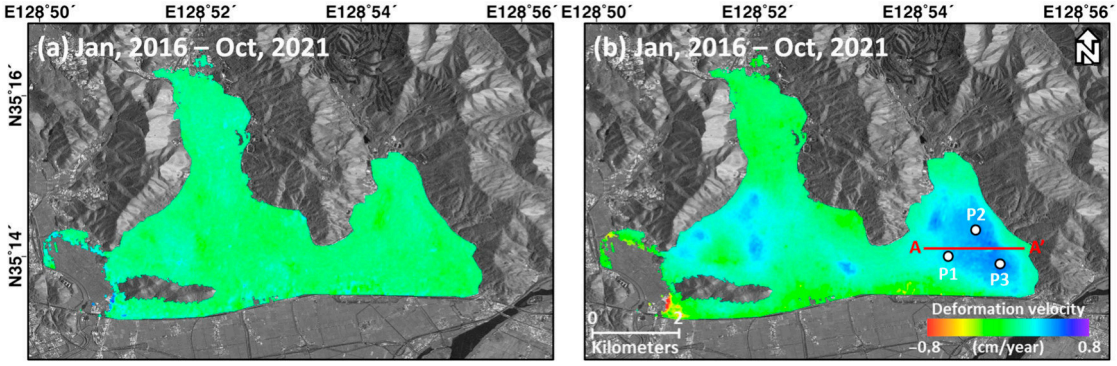


Figure 6. Two-dimensional (2D) deformation velocity maps include (**a**) horizontal and (**b**) vertical components. The three points (P1–P3), marked as white circles, were selected to generate time-series displacement graphs. The red line A-A′ was used in this study to compare deformation velocities across different periods and SAR datasets.

The deformation velocity map derived from ALOS PALSAR data, covering the period from 15 September 2007 to 24 December 2010, revealed no distinct deformation patterns across the study area (Figure 5a). By contrast, the deformation velocity map from COSMO-SkyMed data acquired between 9 January 2013 and 20 April 2019 indicated significant surface uplift in the eastern part of the study area. This uplift showed a maximum cumulative displacement of approximately 8.2 cm over 6 years and a maximum deformation velocity of 1.5 cm/year (Figure 5b). Figure 5c,d present deformation velocity maps from the Sentinel-1 descending and ascending tracks, covering the periods from 8 January 2016 to 14 October 2021 and from 20 January 2016 to 8 October 2021, respectively. These maps also reveal surface uplift in a similar region as observed in the COSMO-SkyMed data, with maximum deformation velocities of approximately 0.47 and 0.54 cm/year, respectively. The two decomposed velocity maps derived from Sentinel-1 observations confirmed similar deformation patterns, predominantly in the vertical direction, from January 2016 to October 2021 (Figure 6a,b). The maximum vertical velocity reached approximately 0.54 cm/year, whereas the horizontal deformation velocities were negligible, converging near zero. These results highlight the important spatial characteristics of surface deformation. The observed uplift patterns were concentrated along the deepest GWL contour line, indicating a spatial correlation between groundwater conditions and deformation signals. During groundwater recovery, the largest variations typically occur in areas where GWLs are the deepest, which can lead to a more pronounced uplift relative to surrounding regions. In this study, the uplift signals were aligned with the deepest contour line, approximately −10 m above sea level (Figure 5b), suggesting that deformation is closely related to groundwater processes. Another notable spatial feature of the uplift pattern is that it developed between the two lineament structures within the study area. This spatial correlation suggests a relationship between the surface uplift phenomena and groundwater fluctuations. These results highlight the importance of groundwater dynamics in driving surface deformation and offer insights into the interplay between subsurface hydrology and surface geodynamics.

For further analysis, we focused on the surface uplift signals observed between the two major lineament structures in the eastern part of the urban area, where all subsequent analyses were conducted. Figure 7 presents the annual cumulative deformation, showing the relative cumulative changes for each satellite dataset with respect to the first acquisition. A clear and consistent uplift pattern is observed in the eastern region of the study area, indicating gradual and sustained deformation over time. Consistent with the velocity maps shown in Figure 5, negligible deformation was detected in the ALOS PALSAR results, whereas continuous uplift was observed during the COSMO-SkyMed and Sentinel-1 observation periods.

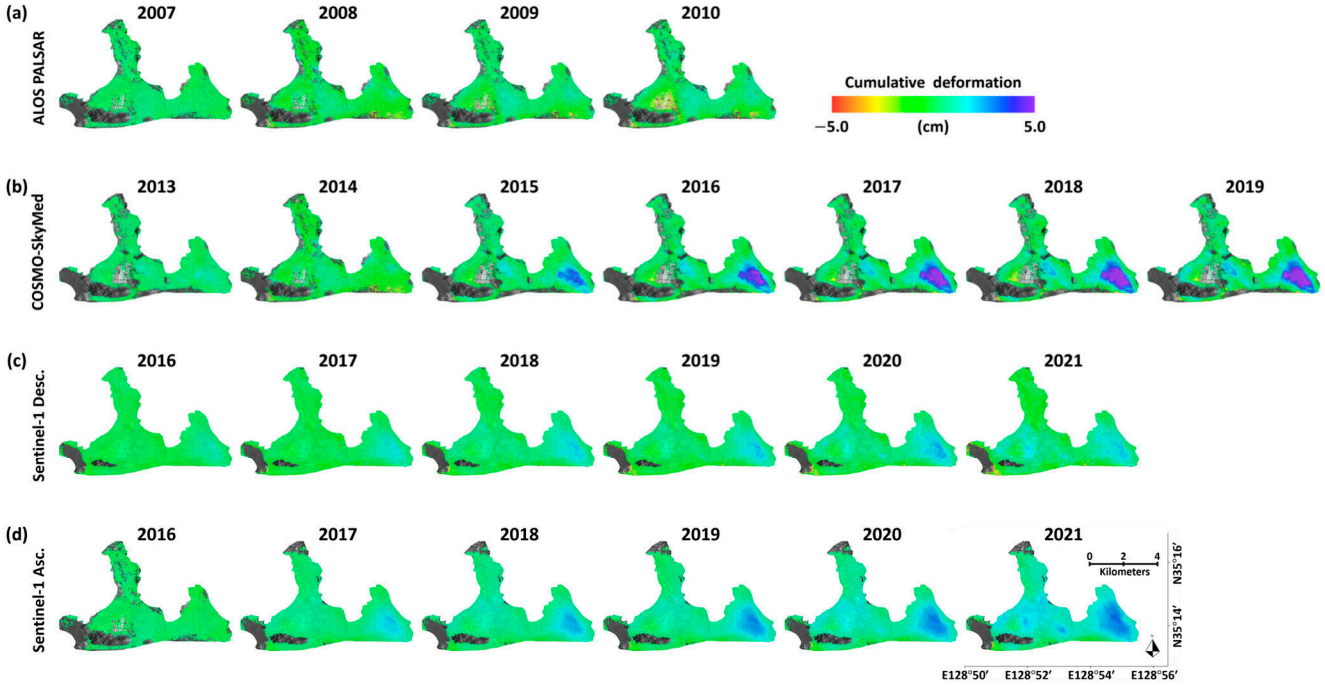


Figure 7. Annual cumulative deformation for (**a**) ALOS PALSAR, (**b**) COSMO-SkyMed, (**c**) Sentinel-1 descending, and (**d**) ascending datasets, showing the spatiotemporal variations in deformation. The deformation maps illustrate relative changes referenced to the first acquisition for each satellite.

4.2. Correlation Between Surface Uplift and GWL Changes

To compare the time-series displacements derived from the MT-InSAR and GWL changes, the observed displacement in the LOS direction was converted into the vertical direction using the incidence angle, as described in Section 3. This conversion ensured that the displacement data were aligned with the vertical GWL changes for an accurate correlation analysis. Daily GWL data were resampled into monthly data to remove outliers and fill gaps caused by missing values. The resampled GWL time-series data were decomposed into three components—trend, seasonal, and residual—using the STL method with a 1-year seasonal cycle (Figure 8). The STL decomposition results revealed a clear long-term rising trend and distinct seasonal patterns in GWL at both monitoring stations. A positive slope was identified in the trend component, indicating a gradual increase in the GWL over time. By contrast, the seasonal component exhibited a slope close to zero, reflecting its cyclic nature and confirming that the seasonal variability was effectively separated from the long-term trend. By applying the STL method, we isolated long-term GWL changes and better assessed their relationship with surface deformation.

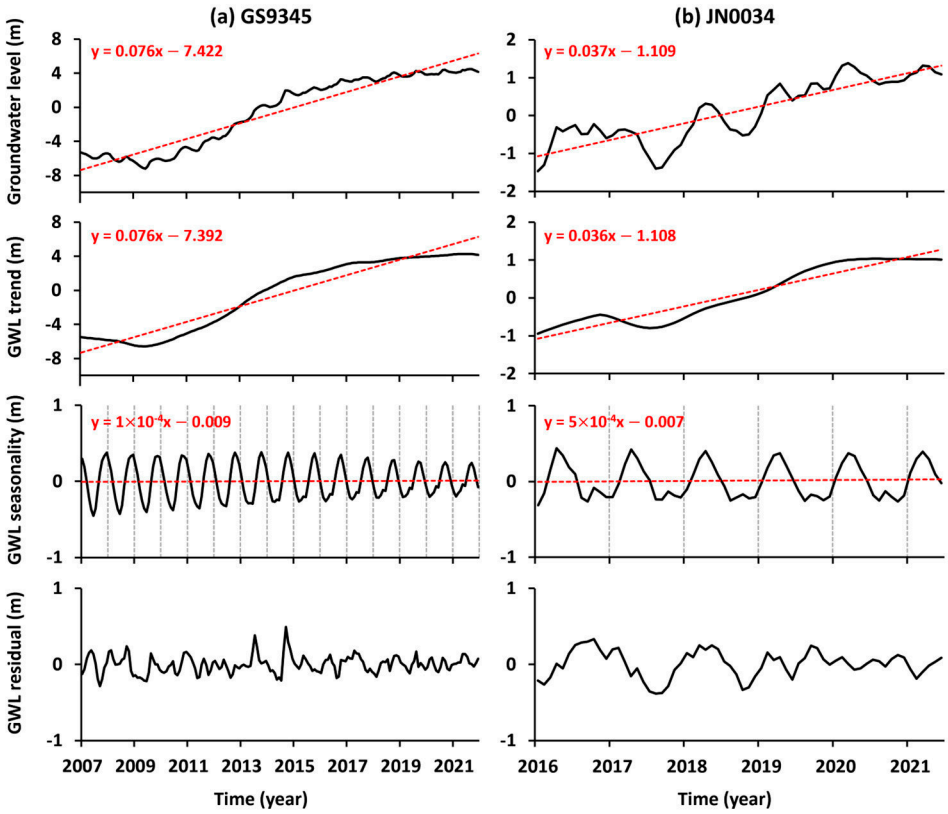


Figure 8. Plots of decomposed groundwater level were generated using average monthly data collected from (**a**) GS9345 and (**b**) JN0034, analyzed using the Seasonal Trend decomposition using the Loess (STL) method. Each graph presents the groundwater level, trend, seasonality, and residuals from top to bottom. The black solid line represents the data for each component, and the red dashed line shows the linear model equation for each component.

Time-series displacement graphs were generated for three points (P1, P2, and P3), as shown in Figure 9. Because the InSAR-derived time-series results represented the displacement with respect to the first acquisition of each dataset, a consistent referencing step was required. The GWL data was used as an absolute reference, and for each SAR dataset, a constant offset was determined by minimizing the root mean square error (RMSE) between the displacement and GWL time series. This constant was then applied to each time series, enabling the deformation results from the different sensors to be aligned and directly compared. The time-series displacement at the three points revealed uplift patterns corresponding to the GWL fluctuations. After removing seasonality, the long-term rising trend of the GWL was reflected in the surface uplift, suggesting that groundwater recharge increased the pore pressure and induced surface deformation (Figure 9).

ALOS PALSAR observations show deformation velocities of 0, 0.46, and 0.02 cm/year at points P1, P2, and P3, respectively. The total GWL changes during this period were measured as 1.16 m before removing seasonality and 0.60 m after seasonal adjustment. These results indicated that GWL fluctuations were minimal during the observation period. At points P1 and P3, the deformation velocities were nearly zero, suggesting that surface deformation in these areas was largely unaffected by groundwater changes. However, a slight surface uplift was detected at point P2, with localized regions exhibiting a small cumulative displacement of less than 1 cm. This localized uplift indicates that even during minimal GWL fluctuations, certain areas may still experience minor surface deformation owing to localized factors. Between 2013 and 2019, COSMO-SkyMed observations were accompanied by a significant groundwater rise (5.34 m), with GWL increasing from −1.72 to 3.62 m relative to sea level. This period exhibited the highest deformation ve-

locities, with 0.82, 0.89, and 1.10 cm/year at P1, P2, and P3, respectively. These results indicate a strong correlation between rapid GWL rise and surface uplift in the eastern region. The Sentinel-1 descending and ascending results (2016–2021) displayed similar patterns, consistent with the GWL changes. At P1, deformation velocities were 0.35 and 0.41 cm/year for descending and ascending orbits, respectively. At P2, the velocities were 0.40 and 0.52 cm/year, whereas P3 exhibited 0.46 and 0.48 cm/year, respectively. During this period, GWL rose continuously until 2019, increasing by 1.63 m (from 2.03 m to 3.66 m) before stabilizing with a smaller rise of 0.43 m (from 3.66 to 4.09 m) between 2019 and 2021. Interestingly, this nonlinear pattern in GWL changes, characterized by a decreasing trend after 2019, was also reflected in the Sentinel-1 deformation results. Cumulative displacement along the descending orbit was 2.42 cm until 2019; however, it showed negligible displacement (−0.02 cm) from 2019 to 2021. The annual velocities of the GWL rise and surface deformation were calculated, revealing a notable increase in the GWL rise velocity between 2010 and 2016 (Figure 10). During this period, COSMO-SkyMed and Sentinel-1 results showed high deformation velocities. By contrast, before 2010, GWL changes did not exhibit a consistent increasing or declining trend, and the observed fluctuations were not sufficiently large to generate noticeable or anomalous surface displacements. During this period, the annual velocity estimates derived from ALOS PALSAR also revealed patterns that were uncorrelated with the GWL, with opposite signals detected at P2 in 2008. This indicates that the estimated time-series displacements do not provide clear evidence of ground movements driven by GWL changes. Moreover, the observed displacements may have been affected by phase uncertainties caused by variations in the wavelength of the signal or localized ground conditions rather than groundwater variations. After 2016, both the GWL and displacement velocities stabilized.

As the groundwater fluctuations gradually decreased and stabilized, the time-series displacements also exhibited nonlinear patterns. To interpret these patterns, an exponential function model was suggested as an effective approach in a previous study [52]. Using an exponential function model, we generated scatter plots to analyze the correlation between MT-InSAR observations and GWL data. The coefficient of determination (R^2) was calculated to quantify the strength of this relationship (Figure 11). To assess the uncertainty in the correlation analysis, we calculated the correlation coefficient (R) with a 95% confidence interval (CI); the lower and upper bounds of the CI are presented in parentheses (see Table S1 of the Supplementary Materials). The time-series displacement data were resampled to monthly averages and compared with the corresponding monthly GWL data, and the long-term trend was derived from the STL method to enable direct comparison. At point P1, the correlation analysis of the ALOS PALSAR data showed a relatively low R value of 0.58, with 95% CI ranging from 0.34 to 0.76. The R^2 values were also lower than those of the other datasets, with 0.34 for GWL changes and 0.58 for the GWL trend (Figure 11a). Similarly, at points P2 and P3, R^2 values were less than 0.4, indicating weak correlations (Figures S3 and S4 in Supplementary Materials). The relatively low R^2 values of the ALOS PALSAR dataset, together with the large CI of R compared with the other datasets, indicate a weak correlation with GWL. This suggested that no significant groundwater fluctuations affected the surface during the observation period. Between 2007 and 2010, no clear rising or declining trends were observed in either the GWL or the surface displacement data, in contrast to the period after 2011 (Figures 3 and 9). Therefore, it is likely that the surface may not have been substantially affected by groundwater variations during this earlier period, resulting in a weak correlation between the GWL and surface displacement. The strongest correlation was observed for the COSMO-SkyMed dataset. At P1, an R value of 0.96 was calculated, with 95% CI ranging from 0.94 to 0.98. The R^2 values were 0.92 for GWL changes and 0.96 for the GWL trend, highlighting a robust relationship between surface deformation

and groundwater dynamics during this period (Figure 11b). The Sentinel-1 data also demonstrated strong correlations across different orbital tracks. For the descending track, the *R* value was 0.89, with the 95% CI ranging from 0.83 to 0.93. For the ascending track, the *R* value was 0.88, with the CI ranging from 0.81 to 0.92. The corresponding R^2 values were 0.79 and 0.78 for GWL changes and 0.90 and 0.83 for seasonally detrended GWL (Figure 11c,d). Similar statistical metrics were observed at points P2 and P3 across all the SAR datasets, reinforcing the robustness of these results (Figures S3 and S4).

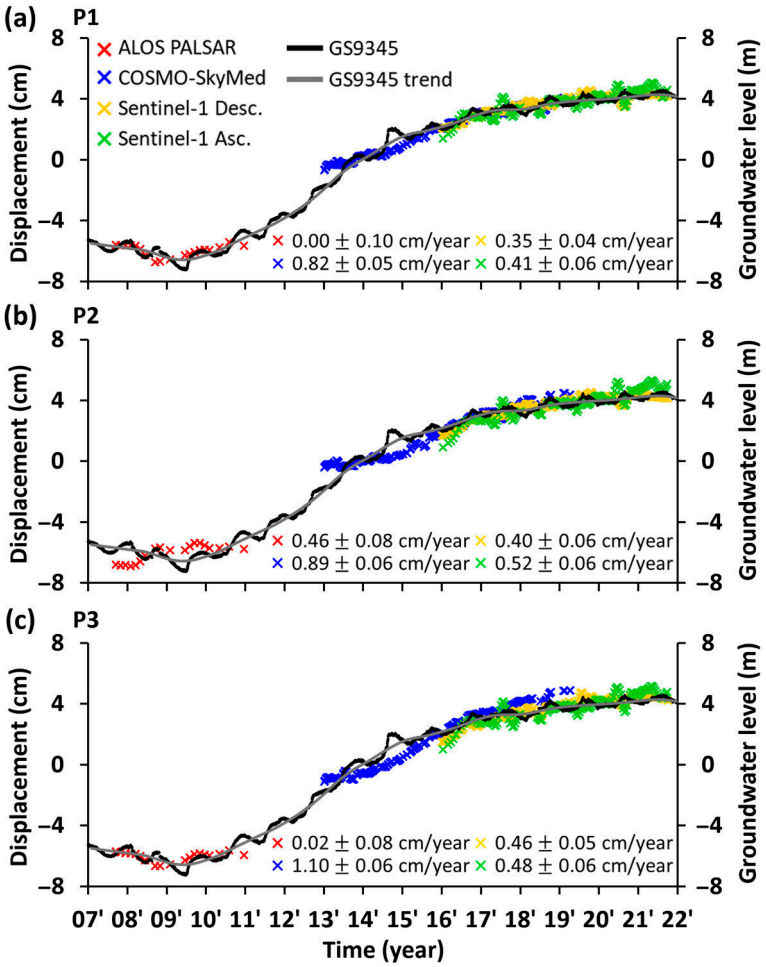


Figure 9. Time-series displacement graphs at (**a**) P1, (**b**) P2, and (**c**) P3. The groundwater level (GWL) and its trend are shown as solid black and gray lines, respectively. The red, blue, yellow, and green symbols represent the calculated displacement observed using ALOS PALSAR, COSMO-SkyMed, and Sentinel-1 descending and ascending datasets, respectively.

Figure 12 illustrates the variation in deformation velocities along the A-A′ profile for the four deformation velocity maps and two decomposed maps. The ALOS PALSAR observations revealed a slight uplift velocity in the central part of the profile, suggesting minimal deformation during the observation period. By contrast, the COSMO-SkyMed data showed high uplift velocities across most profile sections, which is consistent with the significant groundwater rise observed during the same period. The Sentinel-1 descending and ascending data displayed moderate uplift signals along the entire profile, with deformation velocities slightly lower than those of COSMO-SkyMed. The vertical deformation along the profile exhibited trends similar to those of the Sentinel-1 results, confirming the predominance of vertical deformation. The horizontal component remained near zero throughout the profile. Furthermore, Figure 12 confirms that the observed uplift

velocities along profile A-A′ occurred between the two lineament structures, suggesting an association between these geological settings and the deformation patterns.

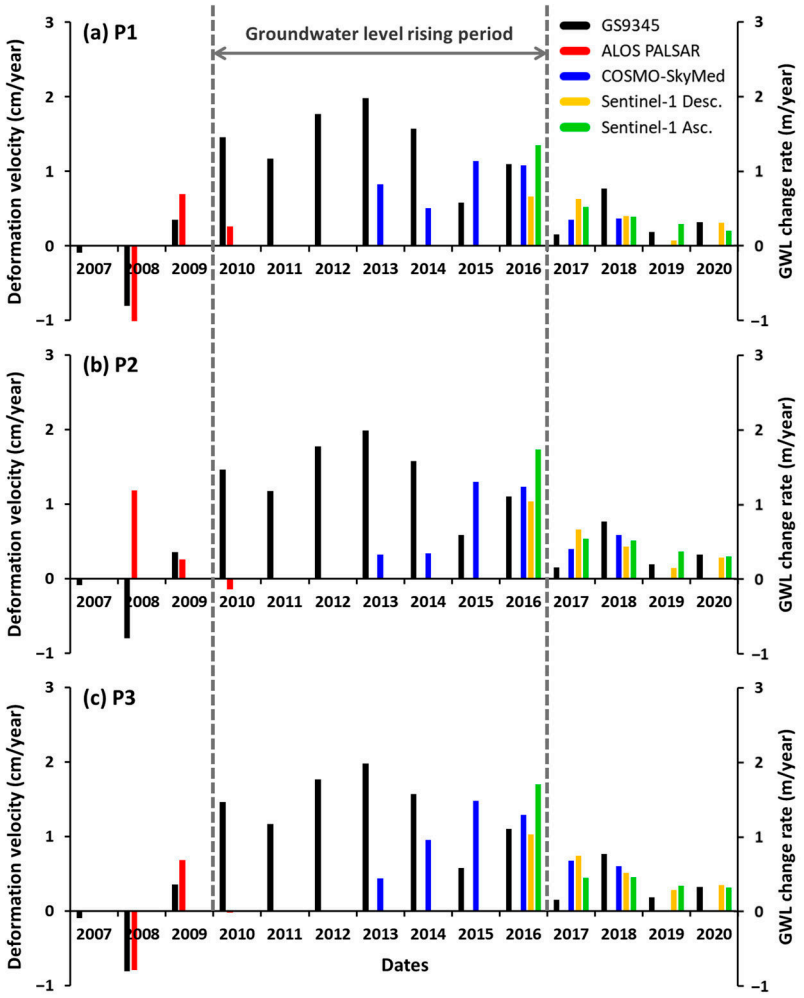


Figure 10. Annual velocities of GWL and surface deformation were analyzed at (**a**) P1, (**b**) P2, and (**c**) P3.

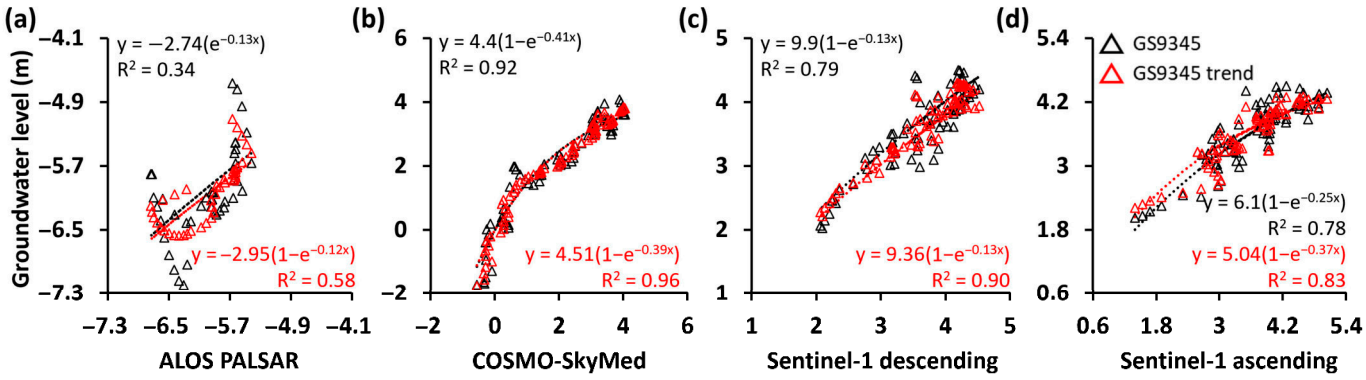


Figure 11. Scatter plots comparing at P1 with GWL and its trend, obtained using the STL method, with displacement from (**a**) ALOS PALSAR, (**b**) COSMO-SkyMed, (**c**) Sentinel-1 descending, and (**d**) ascending tracks.

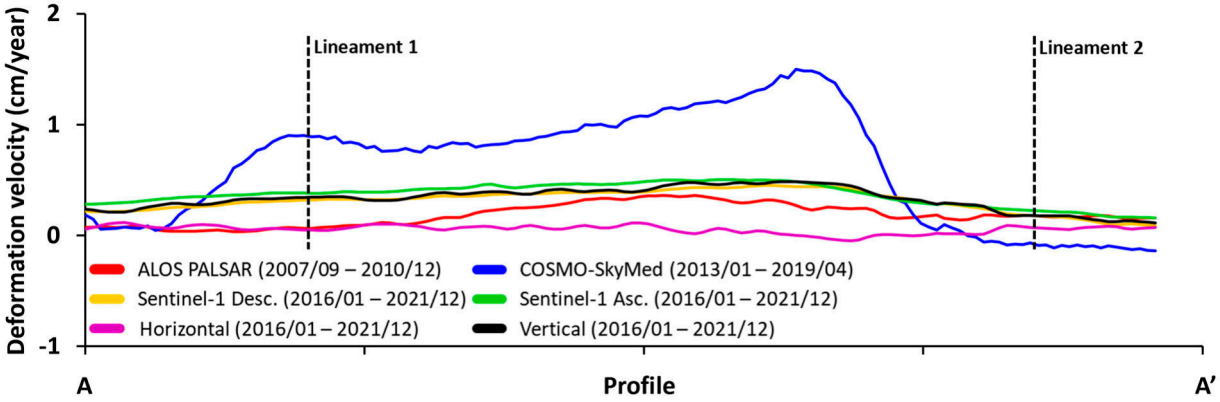


Figure 12. Distribution of deformation velocities along line A-A', derived from the deformation map shown in Figure 6. The four solid-colored lines correspond to the datasets described in Figure 9. The purple and black solid lines also represent deformation velocities in the horizontal and vertical directions, respectively.

5. Discussion

5.1. Time Lag Between Deformation and Groundwater

We estimated the time lag between the MT-InSAR observations and GWL changes by identifying the maximum coefficient of determination (R^2) after applying a time delay to the data. As shown in Figure 11, the R^2 values for the correlation between the time-series displacement and GWL trend were higher than those for the direct correlation with GWL values. Although both comparisons demonstrated a strong correlation, the time lag was calculated using the GWL and its trend to ensure a comprehensive analysis. For this analysis, we focused on the time-series displacement data obtained from COSMO-SkyMed and Sentinel-1, excluding ALOS PALSAR because of its relatively low R^2 values compared with the other SAR datasets. The time resolutions of the COSMO-SkyMed and Sentinel-1 datasets (30 days) were resampled to monthly averages. Consequently, the time lag was calculated by incrementally adding time intervals of 30 days, starting from zero. The time lag calculated for the COSMO-SkyMed data to the GWL showed a significant delay ranging from 510 to 780 days. Similar delays (510–660 days) were observed compared with the GWL trend. These results suggest that the long-term rising trend of the GWL from 2013 to 2019 was predominantly reflected in the COSMO-SkyMed observations, with a time lag of approximately 2 years. However, the time lag calculated using Sentinel-1 data was much shorter, ranging from 0 to 120 days. This relatively short lag may indicate that the surface deformation observed by Sentinel-1 was more strongly affected by short-term effects, such as seasonal variations, than by long-term trends. The shorter observation period for Sentinel-1 compared to COSMO-SkyMed may also constrain its ability to accurately estimate time lags [53]. However, we suggest that the main cause of the negligible lag in Sentinel-1 was the stabilization of the GWL. Since 2016, the rising trend of the GWL has leveled off, and the physical influence of groundwater fluctuations on the surface is presumed to have weakened. During the COSMO-SkyMed period, a total uplift of 8.2 cm was observed, whereas during the Sentinel-1 period, only a 2.4 cm total displacement was detected. This reduced magnitude likely imposes a limitation on the estimation of the long-term lag effects highlighted in this study. The calculated time lags and coefficients of determination for each satellite at P1–P3 are summarized in Table S2 of the Supplementary Materials, and the results of the time-lag compensation graph are shown in Figure S5 (see Supplementary Materials for details). Although the correlation analysis showed higher R^2 values after compensating for the time delay, time-lag estimation was feasible only when significant displacement patterns were present. Moreover, the estimated

time lag may vary depending on hydrogeological factors, such as deposit type, aquifer characteristics, thickness, and seasonal effects [54,55]. For instance, when seasonal effects are retained in Sentinel-1 data showing minute surface displacement, the estimated time lag is reduced to 0 days. These values suggest that the residual deformation may continue even after GWL stabilization [52,56]. Furthermore, the time lag of approximately 2 years estimated in our study, which used the STL method to separate seasonality, was larger than that reported in previous studies. This suggests that long-term observation is essential in regions that have experienced displacement to prepare for potential additional damage while accounting for seasonal variability. This analysis provides insights into the temporal relationship between GWL changes and surface deformation, reflecting the observational capabilities of SAR datasets and the underlying hydrogeological processes.

5.2. Validation and Reliability of MT-InSAR Analysis

The main objective of this study was to investigate the time series of surface deformation occurring in Gimhae City, South Korea, where GWLs have been continuously increasing for over a decade. Surface uplift signals were successfully detected using MT-InSAR based on the SBAS algorithm. By comparing MT-InSAR observations with GWL data, we demonstrated that fluctuations in the GWL significantly influenced surface deformation. Although validation with terrestrial surveys was not possible owing to the absence of ground-based measurements such as GNSS and leveling, we conducted cross-validation using multi-frequency datasets. Figure 13 presents the correlation analysis between the COSMO-SkyMed and Sentinel-1 datasets during their overlapping period (2016–2019). Datasets acquired from the same orbit showed strong agreement, with an R^2 value of approximately 0.9, whereas those acquired from different orbits yielded lower R^2 values (0.7) owing to differences in the LOS geometry, which were addressed through 2D decomposition. Quantitative validation using the ALOS data was not possible because only a single-track dataset was available. The high reliability of the deformation signals was confirmed using standard deviation maps and scatter plots derived from statistical methods (Figures S1 and S2). These maps showed minimal residual phase noise, indicating the robustness of the MT-InSAR results. Despite employing several indirect validation approaches, uncertainties may remain, particularly those related to the choice of reference point and omission of the north–south displacement component. Therefore, future work should incorporate ground-based measurements or additional independent datasets to further improve the reliability of MT-InSAR results.

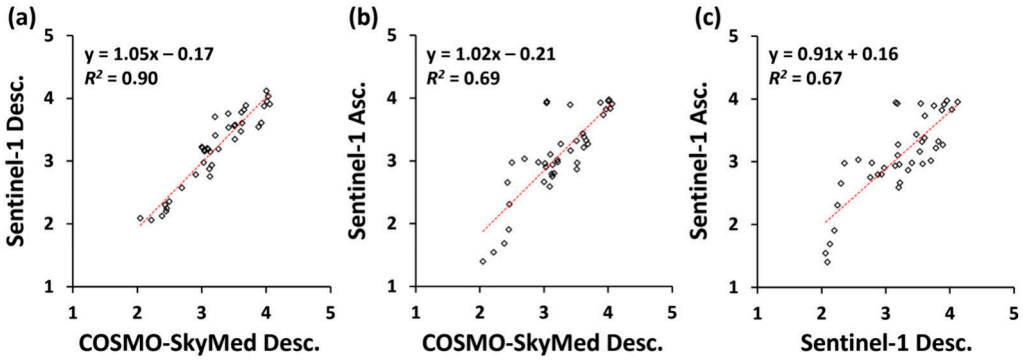


Figure 13. Scatter plots of cross-validation between COSMO-SkyMed and Sentinel-1 at P1. Each graph shows the correlation between COSMO-SkyMed descending and (**a**) Sentinel-1 descending, (**b**) Sentinel-1 ascending, and (**c**) between Sentinel-1 descending and ascending.

To compare the MT-InSAR observations and the GWL data, we primarily used data from the GS9345 monitoring station, located approximately 1.5 km from the observed

deformation area. However, this validation was constrained by the limited availability and quality of GWL data from other monitoring stations. Only the GS9345, which has been operating since 1995 as part of the National Groundwater Monitoring Network, provided a long-term, continuous GWL record. By contrast, several other monitoring stations, including the JN0034 station operated by local municipalities, were installed after 2013 or provided discontinuous records owing to equipment issues. The JN0034 station also exhibited unstable data after outlier removal and contained gaps in the time series, as shown in Figure 3. In addition, the data management of this supplementary station was not as consistent as that of the national stations, which limited its suitability for validation. Therefore, although the JN0034 station provided GWL data from July 2016 to the present, we excluded this station from comparison and validation. Consequently, only GS9345 was used for surface deformation correlation analysis. The JN0034 station was referenced solely to illustrate the recent rise in GWL since 2016, which supports the upward GWL in the uplifted regions (Figure 3).

The observed surface uplift was spatially concentrated in specific areas. These uplifted areas correspond to regions where the aquifer is widely distributed and supports intergranular flow (Figure 2c). The deformation patterns appeared to be influenced by both the regional GWL distribution and the presence of two prominent lineament structures (Figure 5). In locations where the GWL is the deepest, recharge may occur more readily to restore hydrostatic equilibrium, potentially resulting in a more pronounced uplift compared to the surrounding regions. Moreover, lineament structures may act as barriers or conduits that influence groundwater flow pathways and regional deformation patterns, which is consistent with previous findings [57]. These geological features are known to significantly affect groundwater flow and aquifer distribution [58,59]. Lineaments often indicate subsurface structures, such as faults, joints, and fractured zones, and their characteristics, including density, orientation, and scale, strongly influence groundwater storage. Therefore, lineament analysis has been widely applied to groundwater investigations [60,61]. The relationship between structural lineaments and surface deformation has also been demonstrated in numerous studies, where deformation patterns have been examined around identified lineaments to better understand structural control [62]. In this context, the aquifer system located between the two lineaments may have experienced vertical expansion owing to groundwater recharge, particularly in areas composed of soft ground materials, thereby contributing to the observed surface uplift. These effects are clearly reflected in the spatial characteristics of the surface deformation observed using the MT-InSAR method. Although specific hydrogeological data such as fracture orientation, borehole lithology, and hydraulic conductivity were not available for our study area, limiting a more detailed analysis of the lineaments, it is presumed that in this region, the lineaments may act as barriers, leading to differences in the aquifer properties across them. Furthermore, the absence of a 2D hydraulic conductivity map restricts precise spatial assessment of subsurface heterogeneity. Nevertheless, the spatial correlation between the observed uplift and location of the lineaments suggests a potential structural control of the subsurface hydrology, and the captured regions may be more susceptible to uplift induced by GWL variations. Further geological investigations are required to confirm these mechanisms.

To strengthen the link between GWL variations and surface uplift, several previous studies have applied hydrogeological modeling related to skeletal storage coefficients or groundwater storage in aquifer systems [63–65]. These parameters represent the storage capacity of the aquifer system in response to GWL variations and are closely related to the surface displacement induced by groundwater changes. However, in this study, the limited spatial distribution of groundwater stations prevented the application of such modeling.

More comprehensive insights are possible with additional hydrogeological investigations of the aquifer systems. A detailed examination of aquifer properties combined with the inversion of surface deformation data could support the development of a localized hydrogeological model in future research. Such modeling would allow for a more precise characterization of subsurface changes and their interaction with surface deformation, underscoring the importance of conducting additional field surveys within the study area. Nevertheless, we demonstrated the relationship between the GWL and surface uplift using spatial hydrogeological data, including GWL contour lines, geological lineaments, and groundwater stations, and confirmed that they exhibit a strong spatiotemporal correlation. Our findings underscore the importance of integrating geospatial and geological analyses to better understand the mechanisms driving surface deformation.

5.3. Complement Infrastructure Stability and Groundwater Management Using MT-InSAR

The observed surface uplift in the study area, driven by the rising GWL, suggests that the region consists of soft ground that is highly responsive to groundwater dynamics. Such continuous fluctuations in GWL, either increasing or decreasing, may result in additional surface deformation beyond the observation period. Given the associated risk of infrastructure instability, further site-specific hydrogeological investigations, such as the installation of monitoring wells and stratigraphic profiling of aquifer systems, are warranted. As demonstrated in this study, integrating MT-InSAR observations and time-lag analysis offers a practical framework for managing groundwater resources and infrastructure in a coordinated manner. By enhancing our understanding of the hydrogeological relationships between aquifers and surface deposits, this approach supports informed decision-making for sustainable management. Considering the complexity of these interactions, long-term monitoring is necessary to develop a more comprehensive assessment by integrating leveling data with multi-frequency SAR datasets [66,67]. Prior research has highlighted the value of integrated approaches for informing adaptive governance strategies [68,69]. These strategies can help mitigate the secondary cascading effects of GWL variations, such as sand liquefaction, land compaction, surface uplift, and infrastructure damage.

6. Conclusions

In this study, we investigated the surface uplift in the urban area of Gimhae City, South Korea, using the following four SAR datasets: ALOS PALSAR, COSMO-SkyMed, and Sentinel-1 descending and ascending tracks. Long-term deformation observations were conducted by leveraging datasets covering different periods. This approach allowed us to compare the variations in GWL fluctuations and their corresponding surface displacements during each observation period.

From 2007 to 2010, when GWL changes were minimal, the deformation velocities observed in the ALOS PALSAR data were also close to zero, indicating little to no surface displacement. However, between 2013 and 2019, the period marked by a rapid rise in the GWL, COSMO-SkyMed observations captured the most significant surface uplift. This uplift corresponded to a cumulative displacement of 8.2 cm, highlighting the significant impact of rapid groundwater recharge on surface deformation. In the latter part of the observation period, from 2016 to 2021, Sentinel-1 data represented approximately 1.0 cm of nonlinear deformation patterns, reflecting the gradual stabilization and reduction in GWL rise. These results demonstrate the capability of MT-InSAR techniques in detecting subtle deformation trends over time, even under conditions of reduced groundwater variability.

Notably, the uplift phenomenon was concentrated along the deepest GWL contour line and between two prominent lineament structures in the study area. This spatial correlation suggests that geological features such as lineaments or faults might be critical in modu-

lating surface deformation in response to GWL changes. Correlation analysis between GWL changes and time-series displacement showed a high coefficient of determination (R^2), confirming that surface deformation reflects the vertical movement of aquifers caused by GWL rise. Our results demonstrated that the persistent surface uplift observed in the study area was directly affected by long-term GWL variations. By analyzing more than a decade of data, rather than focusing solely on seasonal effects, we identified distinct patterns of displacement. Furthermore, applying STL decomposition to groundwater measurement data revealed a significant time lag of approximately 2 years. This lag is longer than that reported in previous studies and may reflect the specific hydrogeological characteristics of the aquifer system. Combining MT-InSAR observations with various hydrological datasets can provide detailed spatiotemporal information on surface deformation, such as uplift. This integrated approach highlights the potential of monitoring urban groundwater dynamics and their impact on surface stability. In future research, we aim to develop groundwater-induced deformation models for specific regions by integrating field investigations with recent InSAR-derived deformation observations. Such efforts could support the development of practical frameworks for aquifer management and deformation hazard assessment, including the establishment of an integrated monitoring system based on InSAR techniques. Furthermore, as the study area continues to undergo rapid urban development, combining InSAR results with socioeconomic and field-based data could provide valuable insights for urban planning and future development strategies, emphasizing the importance of continued interdisciplinary research.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at https://www.mdpi.com/article/10.3390/rs17233875/s1, Figure S1: Standard deviation maps of the residual phase were derived from (a) ALOS PALSAR, (b) COSMO-SkyMed, (c) Sentinel-1 descending, and (d) Sentinel-1 ascending datasets. The white triangle indicates the reference point used in the SBAS processing, whereas the black rectangle corresponds to the same areas, as depicted in Figure 5; Figure S2: Scatter plots showing the relationship between the standard deviation and coherence for the area shown in Figure 5, based on the MT-InSAR results derived from (a) ALOS PALSAR, (b) COSMO-SkyMed, (c) Sentinel-1 descending, and (d) ascending datasets; Figure S3: Scatter plots comparing P2 with GWL and its trend, obtained using the STL method, with displacement from (a) ALOS PALSAR, (b) COSMO-SkyMed, (c) Sentinel-1 descending, and (d) ascending tracks; Figure S4: Scatter plots comparing P3 with GWL and its trend, obtained using the STL method, with displacement from (a) ALOS PALSAR, (b) COSMO-SkyMed, (c) Sentinel-1 descending, and (d) ascending tracks; Figure S5: Comparison between time-series displacement and GWL graphs before and after time-lag compensation at P1–P3 for (a–c) COSMO-SkyMed and (d–f) Sentinel-1 descending; Table S1: Correlation coefficient with a 95% confidence interval (CI) between the groundwater fluctuations and time-series displacement was calculated for each satellite from P1 to P3. R is the correlation coefficient and the CI is indicated in brackets; Table S2: Time lag between the groundwater fluctuations and time-series displacement was calculated for each satellite at points P1–P3. τ_{GWL} and τ_{trend} represent the time lag in days, derived from comparison with groundwater levels (GWL) and their trend, respectively. $R^2{}_{GWL}$ and $R^2{}_{trend}$ indicate the coefficients of determination for the relationships between GWL, its trend, and the time-series displacement, incorporating the calculated time lag.

Author Contributions: Conceptualization, S.P. and S.-H.H.; methodology, S.P. and S.-H.H.; validation, S.P. and S.-H.H.; writing—original draft preparation, S.P. and S.-H.H.; writing—review and editing, S.P., S.-H.H. and F.C.; visualization, S.P.; supervision, S.-H.H. and F.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: Groundwater information, including daily level measurement data, level contour maps, and flow direction, was acquired from the National Groundwater Information

Management and Service Center (GIMS) (https://www.gims.go.kr/en/hydrogeologicalMaps.do, accessed on 14 November 2025). The locations of the lineament structures were provided by the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) via the Geo Big Data Open Platform (https://data.kigam.re.kr/map, accessed on 14 November 2025) using the 2019 version of the lineament map. The time-series datasets utilized in this study can be accessed at the following repository (https://doi.org/10.5281/zenodo.14728790, accessed on 22 October 2025).

Acknowledgments: The authors would like to thank the European Space Agency (ESA) for providing Sentinel-1A/B data and the Italian Space Agency (ASI) for offering COSMO-SkyMed products under an ASI license through the framework of the COSMO-SkyMed Open Call for Science (Project ID 779). The ALOS PALSAR data were provided by the Japanese Space Exploration Agency (JAXA) under the 4th research agreement (PI No. 1237) and the 2nd Research Announcement on Earth Observations (PI No. ER2A2N057). This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) under Grant NRF-2023R1A2C1003609.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Taylor, C.J.; Alley, W.M. *Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data*; US Geological Survey: Denver, CO, USA, 2001; Volume 1217.
2. Adams, K.H.; Reager, J.T.; Rosen, P.; Wiese, D.N.; Farr, T.G.; Rao, S.; Haines, B.J.; Argus, D.F.; Liu, Z.; Smith, R. Remote sensing of groundwater: Current capabilities and future directions. *Water Resour. Res.* **2022**, *58*, e2022WR032219. [CrossRef]
3. Galloway, D.L.; Hoffmann, J. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeol. J.* **2007**, *15*, 133–154. [CrossRef]
4. Galloway, D.L.; Hudnut, K.W.; Ingebritsen, S.; Phillips, S.P.; Peltzer, G.; Rogez, F.; Rosen, P. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resour. Res.* **1998**, *34*, 2573–2585. [CrossRef]
5. Tolman, C.F.; Poland, J.F. Ground-water, salt-water infiltration, and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* **1940**, *21*, 23–35.
6. Amelung, F.; Galloway, D.L.; Bell, J.W.; Zebker, H.A.; Laczniak, R.J. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology* **1999**, *27*, 483–486. [CrossRef]
7. Cabral-Cano, E.; Dixon, T.H.; Miralles-Wilhelm, F.; Díaz-Molina, O.; Sánchez-Zamora, O.; Carande, R.E. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geol. Soc. Am. Bull.* **2008**, *120*, 1556–1566. [CrossRef]
8. Chaussard, E.; Amelung, F.; Abidin, H.; Hong, S.-H. Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sens. Environ.* **2013**, *128*, 150–161. [CrossRef]
9. Cigna, F.; Tapete, D. Land Subsidence and Aquifer-System Storage Loss in Central Mexico: A Quasi-Continental Investigation With Sentinel-1 InSAR. *Geophys. Res. Lett.* **2022**, *49*, e2022GL098923. [CrossRef]
10. Bateson, L.; Cigna, F.; Boon, D.; Sowter, A. The application of the Intermittent SBAS (ISBAS) InSAR method to the South Wales Coalfield, UK. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2015**, *34*, 249–257. [CrossRef]
11. Hoffmann, J.; Zebker, H.A.; Galloway, D.L.; Amelung, F. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resour. Res.* **2001**, *37*, 1551–1566. [CrossRef]
12. Karanam, V.; Lu, Z.; Kim, J.W. Investigation of oil well blowouts triggered by wastewater injection in the Permian Basin, USA. *Geophys. Res. Lett.* **2024**, *51*, e2024GL109435. [CrossRef]
13. Lu, Z.; Danskin, W.R. InSAR analysis of natural recharge to define structure of a ground-water basin, San Bernardino, California. *Geophys. Res. Lett.* **2001**, *28*, 2661–2664. [CrossRef]
14. Bhanja, S.N.; Mukherjee, A.; Rangarajan, R.; Scanlon, B.R.; Malakar, P.; Verma, S. Long-term groundwater recharge rates across India by in situ measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2019**, *23*, 711–722. [CrossRef]
15. Ji, K.H.; Herring, T.A. Correlation between changes in groundwater levels and surface deformation from GPS measurements in the San Gabriel Valley, California. *Geophys. Res. Lett.* **2012**, *39*, L01301. [CrossRef]
16. Slater, L. Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries—A review. *Surv. Geophys.* **2007**, *28*, 169–197. [CrossRef]
17. Hanssen, R.F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2001; Volume 2.
18. Lee, J. Review of remote sensing studies on groundwater resources. *Korean J. Remote Sens.* **2017**, *33*, 855–866.

19. Riel, B.; Simons, M.; Ponti, D.; Agram, P.; Jolivet, R. Quantifying ground deformation in the Los Angeles and Santa Ana Coastal Basins due to groundwater withdrawal. *Water Resour. Res.* **2018**, *54*, 3557–3582. [CrossRef]
20. Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2002**, *40*, 2375–2383. [CrossRef]
21. Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2001**, *39*, 8–20. [CrossRef]
22. Kim, T.; Han, H. Analysis of surface displacement of oil sands region in Alberta, Canada using Sentinel-1 SAR time series images. *Korean J. Remote Sens.* **2022**, *38*, 139–151.
23. Liu, F.; Elliott, J.; Craig, T.; Hooper, A.; Wright, T. Improving the resolving power of InSAR for earthquakes using time series: A case study in Iran. *Geophys. Res. Lett.* **2021**, *48*, e2021GL093043. [CrossRef]
24. Su, G.; Xiong, C.; Zhang, G.; Wang, Y.; Shen, Q.; Chen, X.; An, H.; Qin, L. Coupled processes of groundwater dynamics and land subsidence in the context of active human intervention, a case in Tianjin, China. *Sci. Total Environ.* **2023**, *903*, 166803. [CrossRef]
25. Yunjun, Z.; Amelung, F.; Aoki, Y. Imaging the hydrothermal system of Kirishima volcanic complex with L-band InSAR time series. *Geophys. Res. Lett.* **2021**, *48*, e2021GL092879. [CrossRef]
26. Zhang, R.; Zhang, L.; Fang, Z.; Oguchi, T.; Merghadi, A.; Fu, Z.; Dong, A.; Dou, J. Interferometric synthetic aperture Radar (InSAR)-based absence sampling for machine-learning-based landslide susceptibility mapping: The Three Gorges Reservoir area, China. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 2394. [CrossRef]
27. Hamdi, L.; Defaflia, N.; Fehdi, C.; Merghadi, A. InSAR investigation on DRAA-douamis sinkholes in cheria northeastern of Algeria. In Proceedings of the Igarss 2020–2020 IEEE international geoscience and remote sensing symposium, Waikoloa, HI, USA, 26 September–2 October 2020; pp. 1034–1037.
28. Hamdi, L.; Defaflia, N.; Merghadi, A.; Fehdi, C.; Yunus, A.P.; Dou, J.; Pham, Q.B.; Abdo, H.G.; Almohamad, H.; Al-Mutiry, M. Ground surface deformation analysis integrating InSAR and GPS Data in the karstic terrain of Cheria Basin, Algeria. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 1486. [CrossRef]
29. Nikos, S.; Ioannis, P.; Constantinos, L.; Paraskevas, T.; Anastasia, K.; Charalambos, K. Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece. *Eng. Geol.* **2016**, *209*, 175–186. [CrossRef]
30. Park, S.W.; Hong, S.H. Nonlinear modeling of subsidence from a decade of InSAR time series. *Geophys. Res. Lett.* **2021**, *48*, e2020GL090970. [CrossRef]
31. Tang, W.; Zhao, X.; Motagh, M.; Bi, G.; Li, J.; Chen, M.; Chen, H.; Liao, M. Land subsidence and rebound in the Taiyuan basin, northern China, in the context of inter-basin water transfer and groundwater management. *Remote Sens. Environ.* **2022**, *269*, 112792. [CrossRef]
32. Wu, S.; Liu, G.; Wang, X.; Jia, H.; Ding, Y.; Zhang, B.; Mao, W. Assessing Groundwater Level Change and Aquifer Parameters Across Los Angeles and Orange County Using InSAR Measurements and Machine Learning. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2025**, *18*, 12559–12571. [CrossRef]
33. Dou, J.; Yunus, A.P.; Merghadi, A.; Wang, X.-k.; Yamagishi, H. A comparative study of deep learning and conventional neural network for evaluating landslide susceptibility using landslide initiation zones. In Proceedings of the Workshop on World Landslide Forum, Kyoto, Japan, 2–6 November 2020; pp. 215–223.
34. Yang, Y.; Dou, J.; Merghadi, A.; Liang, W.; Dong, A.; Xiong, D.; Zhang, L. Advanced Prediction of Landslide Deformation through Temporal Fusion Transformer and Multivariate Time Series Clustering of InSAR: Insights from the Badui Region, Eastern Tibet. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2024**, *62*, 1–19. [CrossRef]
35. Yu, S.; Kim, H.-R.; Choi, E.-K.; Kim, S.-W.; Ryu, D.-W.; Kim, Y. Resilience Assessment for Aquifers close to Groundwater Wells in the Nakdong River Estuary. *J. Soil Groundw. Environ.* **2023**, *28*, 12–28.
36. Becker, B.; Reichel, F.; Bachmann, D.; Schinke, R. High groundwater levels: Processes, consequences, and management. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* **2022**, *9*, e1605. [CrossRef]
37. Ko, K.; Kihm, Y.H.; Lee, H.-J. Preliminary result of lineament analysis for the potential site selection of HLW geological disposal. *Econ. Environ. Geol.* **2018**, *51*, 167–176.
38. Cleveland, R.B.; Cleveland, W.S.; McRae, J.E.; Terpenning, I. STL: A seasonal-trend decomposition. *J. Off. Stat.* **1990**, *6*, 3–73.
39. Werner, C.; Wegmüller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Gamma SAR and interferometric processing software. In Proceedings of the ERS-Envisat Symposium, Gothenburg, Sweden, 16–20 October 2000; p. 1620.
40. Hong, S.-H.; Wdowinski, S. Multitemporal multitrack monitoring of wetland water levels in the Florida Everglades using ALOS PALSAR data with interferometric processing. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2013**, *11*, 1355–1359. [CrossRef]
41. Hong, S.-H.; Wdowinski, S.; Kim, S.-W. Evaluation of TerraSAR-X observations for wetland InSAR application. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2009**, *48*, 864–873. [CrossRef]
42. Fahrland, E.; Jacob, P.; Schrader, H.; Kahabka, H. *Copernicus Digital Elevation Model Product Handbook*; Airbus Defence and Space—Intelligence: Potsdam, Germany, 2020.

43. Goldstein, R.M.; Werner, C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophys. Res. Lett.* **1998**, *25*, 4035–4038. [CrossRef]
44. Costantini, M. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **1998**, *36*, 813–821. [CrossRef]
45. Werner, C.; Wegmüller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Processing strategies for phase unwrapping for INSAR applications. In Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2002), Cologne, Germany, 4–6 June 2002; pp. 353–356.
46. Schmidt, D.A.; Bürgmann, R. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **2003**, *108*, 2416. [CrossRef]
47. Yunjun, Z.; Fattahi, H.; Amelung, F. Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Comput. Geosci.* **2019**, *133*, 104331. [CrossRef]
48. Wright, T.J.; Parsons, B.E.; Lu, Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophys. Res. Lett.* **2004**, *31*, 169–178. [CrossRef]
49. Fuhrmann, T.; Garthwaite, M.C. Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: Constraints from multi-geometry data fusion. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 241. [CrossRef]
50. Kim, S.; Han, H.; Kim, J.-W.; Jeon, Y.-B.; Lee, S.C. Analysis of Magma Activity during the Cerro Azul Volcanic Unrest in March 2017 Using Sentinel-1 DInSAR Observations. *Korean J. Remote Sens.* **2024**, *40*, 919–930. [CrossRef]
51. Lee, S.; Kim, T.; Han, H.; Kim, J.-W.; Jeon, Y.-B.; Kim, J.-G.; Lee, S.C. Analysis of co-and post-seismic displacement of the 2017 Pohang earthquake in Youngilman Port and surrounding areas using Sentinel-1 time-series SAR interferometry. *Korean J. Remote Sens.* **2024**, *40*, 19–31.
52. Chaussard, E.; Bürgmann, R.; Shirzaei, M.; Fielding, E.J.; Baker, B. Predictability of hydraulic head changes and characterization of aquifer-system and fault properties from InSAR-derived ground deformation. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **2014**, *119*, 6572–6590. [CrossRef]
53. Miller, M.M.; Shirzaei, M. Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift in Phoenix using InSAR time series and wavelet transforms. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **2015**, *120*, 5822–5842. [CrossRef]
54. Normand, J.C.; Heggy, E. InSAR assessment of surface deformations in urban coastal terrains associated with groundwater dynamics. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2015**, *53*, 6356–6371. [CrossRef]
55. Zhang, X.; Cheng, Z.; Xu, B.; Gui, R.; Hu, J.; Yang, C.; Yang, Q.; Xiong, T. Coupling the relationship between land subsidence and groundwater level, ground fissures in Xi'an city using multi-orbit and multi-temporal InSAR. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 3567. [CrossRef]
56. Galloway, D.L.; Burbey, T.J. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J.* **2011**, *19*, 1459. [CrossRef]
57. Brandt, J.T.; Sneed, M.; Danskin, W.R. Detection and measurement of land subsidence and uplift using interferometric synthetic aperture radar, San Diego, California, USA, 2016–2018. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* **2020**, *382*, 45–49. [CrossRef]
58. Mabee, S.B.; Hardcastle, K.C.; Wise, D.U. A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. *Groundwater* **1994**, *32*, 884–894. [CrossRef]
59. Solomon, S.; Quiel, F. Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea. *Hydrogeol. J.* **2006**, *14*, 1029–1041. [CrossRef]
60. Akinluyi, F.O.; Olorunfemi, M.O.; Bayowa, O.G. Investigation of the influence of lineaments, lineament intersections and geology on groundwater yield in the basement complex terrain of Ondo State, Southwestern Nigeria. *Appl. Water Sci.* **2018**, *8*, 49. [CrossRef]
61. Epuh, E.E.; Okolie, C.J.; Daramola, O.E.; Ogunlade, F.S.; Oyatayo, F.J.; Akinnusi, S.A.; Emmanuel, E.-O.I. An integrated lineament extraction from satellite imagery and gravity anomaly maps for groundwater exploration in the Gongola Basin. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* **2020**, *20*, 100346. [CrossRef]
62. Ahmadi, H.; Pekkan, E. Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS—A review. *Geosciences* **2021**, *11*, 183. [CrossRef]
63. Yang, Q.; Zhang, X.; Hu, J.; Gui, R.; Yang, L. Estimation of Land Deformation and Groundwater Storage Dynamics in Shijiazhuang–Baoding–Cangzhou–Hengshui Using Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 1724. [CrossRef]
64. Zhao, D.; Chen, B.; Gong, H.; Lei, K.; Zhou, C.; Hu, J. Unraveling the Deformation and Water Storage Characteristics of Different Aquifer Groups by Integrating PS-InSAR Technology and a Spatial Correlation Model. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2023**, *17*, 2501–2515. [CrossRef]
65. Zhao, X.; Tang, W.; Hao, G.; Zhao, H.; Xiong, W. Characterizing aquifer properties in the Taiyuan Basin, Northern China, using ground deformation from Sentinel-1 InSAR time series analysis. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2025**, *58*, 102313. [CrossRef]

66. Chen, C.-T.; Hu, J.-C.; Lu, C.-Y.; Lee, J.-C.; Chan, Y.-C. Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. *Eng. Geol.* **2007**, *95*, 30–47. [CrossRef]
67. Tang, W.; Zhao, X.; Wang, J.; Motagh, M.; Xu, H.; Ru, Z.; Wang, Y. Land surface response to groundwater drawdown and recovery in Taiyuan city, Northern China, analyzed with a long-term elevation change measurements from leveling and multi-sensor InSAR. *J. Hydrol.* **2024**, *641*, 131781. [CrossRef]
68. Kumar, H.; Syed, T.H.; Amelung, F.; Mirzaee, S.; Venkatesh, A.; Agrawal, R. InSAR reveals recovery of stressed aquifer systems in parts of Delhi, India: Evidence for improved groundwater management. *Water Resour. Res.* **2025**, *61*, e2024WR037704. [CrossRef]
69. Parker, A.L.; Pigois, J.-P.; Filmer, M.S.; Featherstone, W.E.; Timms, N.; Penna, N.T. Land uplift linked to managed aquifer recharge in the Perth Basin, Australia. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2021**, *105*, 102637. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Anexo 1.17 – Plano de Gestão Florestal

forestagri
engenharia

Plano de Gestão Florestal

HERDADES DE MURTA E MONTE NOVO



***Nome do promotor**: Expoente Frugal, Lda.*

Assinatura(s) _____

Plano de Gestão Florestal

HERDADES DE MURTA E MONTE NOVO

Data de submissão: 06/11/2023

Data da 1ª atualização: 03/03/2025

Data da 2ª atualização: 18/05/2026

Os PGF serão sujeitos a revisão de 5 em 5 anos, exceto se ocorrerem alterações nas condições ambientais, sociais e económicas, dados de monitorização (inventário florestal), informação científica e/ou técnica relevante e, se aplicável, qualquer outra informação não mencionada que seja importante referir.

A duração prevista do PGF é de 20 anos.

A veracidade da informação incluída no Documento de Avaliação e do Modelo de Exploração é assegurada por um Termo de Responsabilidade e uma Declaração, apresentados no anexo I.

Os dados e informações constantes neste documento destinam-se exclusivamente à avaliação, aprovação e acompanhamento do PGF, nos termos da Lei, não podendo ser utilizados para outros fins.

Índice

A – DOCUMENTO DE AVALIAÇÃO

1 – Enquadramento social e territorial....5
1.1 – Identificação do proprietário, entidade gestora e equipa responsável pela elaboração do PGF ...5
1.2 – Caracterização geográfica 6
1.2.1– Identificação e inserção administrativa 6
1.2.2 – Localização e acessibilidade da exploração florestal 6
2 – Enquadramento biofísico....6
2.1 – Exposição, relevo e altimetria 6
2.2 – Clima 7
2.3 – Solos....11
2.4 – Fauna, flora e *habitats*.... 12
2.5 – Pragas, doenças e infestantes 13
2.6 – Incêndios florestais, cheias e outros riscos naturais 18
3.1 – Restrições de utilidade pública.... 20
3 – Regimes legais específicos 20
3.2 – Instrumentos de planeamento florestal 23
3.3 – Instrumentos de gestão territorial 23
3.4 – Outros ónus relevantes para a gestão 24
4 – Caracterização dos recursos....27
4.1 – Infraestruturas florestais 27
4.1.1 – Rede viária florestal....27
4.1.2 – Armazéns e outros edifícios associados à gestão 28
4.1.3 – Infraestruturas DFCI 28
4.1.4 – Infraestruturas de apoio à gestão cinegética 31
4.1.5 – Infraestruturas de apoio à gestão silvopastoril....32
4.1.6 – Infraestruturas de apoio ao recreio e turismo 32
4.2 – Caracterização socioeconómica 32
4.2.1 – Função de produção....34
4.2.2 – Função de proteção....34
4.2.3 – Função de conservação 34
4.2.4 – Função de silvopastorícia, caça e pesca 35
4.2.5 – Função de recreio e valorização da paisagem 35
4.2.6 – Áreas Florestais Sensíveis....35
4.2.7 – Evolução histórica da gestão 36

B - MODELO DE EXPLORAÇÃO

1 – Caracterização dos objetivos da exploração....39
1.1 – Caracterização dos recursos....39
1.1.1 – Caracterização geral e compartimentação da UG em parcelas....39
1.1.2 – Componente florestal....46
1.1.3 – Componente silvopastoril....51
1.1.4 – Componente cinegética, aquícola e apícola....51
1.1.5 – Componente de recursos geológicos e energéticos....51
1.1.6 – Componente de recursos geológicos e energéticos....51
1.2 – Organização da gestão e zonamento funcional....52
2 – Programas Operacionais....53
2.1 – Programação de gestão da biodiversidade (áreas classificadas)....56
2.1.1 – Integração das orientações de gestão do PSRN 2000 e outros....61
2.2 – Programa de gestão lenhosa....70
2.3 – Programa de gestão não-lenhosa e outros serviços associados....78
2.4 – Programa de infraestruturas (DFCI, rede viária florestal, cinegética, silvopastorícia e recreio)....79
2.5 – Programa de Operações Silvícolas Mínimas....80
2.6 – Calendarização das intervenções....81

ANEXO I....103
ANEXO II....106
ANEXO III....127
ANEXO IV....136
ANEXO V....140
ANEXO VI....147
ANEXO VII....156
ANEXO VIII....160
ANEXO IX....165

A - Documento de Avaliação

1 – Enquadramento social e territorial

1.1 – Identificação do proprietário, entidade gestora e equipa responsável pela elaboração do PGF

Promotor

Nome: Expoente Frugal, Lda.

NIF: 516 324 420

Morada: Estrada de Alfragide n.º 67, Edifício G 3º Piso, 2610-008 Amadora

E-mail: fernando@aquaterra.farm

Telemóvel: +351 916 758 692

Responsável pela gestão

Nome: Diogo Castel-Branco

Morada: Estrada de Alfragide n.º 67, Edifício G 3º Piso, 2610-008 Amadora

E-mail: diogo.cbranco@aquaterra.farm

Telemóvel: +351 960 276 870

Equipa responsável pela elaboração do PGF

Coordenação Técnica do PGF: Fernanda Vale Dias (Engenheira Agrónoma)

Equipa Técnica:

Elaboração do PGF: Diogo Castel-Branco (Engenheiro Florestal)

Elaboração do PGB: Ana Marques (Bióloga)

Cartografia: Paulo Monteiro (Técnico de SIG)

Contactos:

Morada: Travessa dos Guerreiros n.º 21 A, 2100-218 Coruche

Telefone: 243 660 777 **Telemóvel:** 937 657 446 ***E-mail*:** forestagri@agrigroup.pt

1.2 – CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA

1.2.1– IDENTIFICAÇÃO E INSERÇÃO ADMINISTRATIVA

A unidade de gestão (UG) Herdades de Murta e Monte Novo é constituída por dois prédios rústicos, num total de 2399,18 ha, conforme consta na tabela a seguir e cuja implementação em carta militar se apresenta no mapa n.º 1 do anexo II.

Nome do prédio	N.º de matriz	Distrito	Concelho	Freguesia
Herdade do Monte Novo do Sul	Secção - R Art.º1	Setúbal	Alcácer do Sal	União de freguesias de Alcácer do Sal (Santa Maria do Castelo e Santiago) e Santa Susana
Herdade da Murta	Art.º 1 Secção Q; Q1			

1.2.2 – LOCALIZAÇÃO E ACESSIBILIDADE DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL

O principal acesso à UG é feito pela Estrada Nacional 253, que faz ligação entre o IC1 e a Comporta. Para chegar à UG, seguindo em direção à Comporta, deverá ser seguida a estrada por cerca de 18 km e virar à esquerda, entrando na propriedade.

É confinante a Norte com o rio Sado, a Sul e Oeste com a Herdade da Comporta e a Este com a Herdade do Monte Novo do Sul.

Cartas Militares n.º 466 e 475

2 – ENQUADRAMENTO BIOFÍSICO

2.1 – EXPOSIÇÃO, RELEVO E ALTIMETRIA

A exposição da UG encontra-se representada no mapa n.º 2 do anexo II. Verifica-se que não existe uma exposição dominante.

De um modo geral, os terrenos caracterizam-se por possuírem uma topografia aplanada, verificando-se zonas de declive reduzido.

Em termos altimétricos, a UG varia entre os 0 m e os 50 m, conforme se pode verificar na carta altimétrica apresentada no mapa n.º 3 do anexo II.

2.2 – CLIMA

Para a caraterização climática do concelho de Alcácer do Sal, recorreu-se às Normais Climatológicas da Região do Alentejo e Algarve, para a estação de Alcácer do Sal.

Temperatura

A temperatura do ar condiciona a distribuição dos elementos florísticos e das comunidades vegetais no território e é considerada um dos elementos climáticos fundamentais na descrição do clima de um local, sendo condicionante de todos os processos biológicos. Na sua dependência estão também vários processos físicos e químicos de meteorização (Roxo, 1994).

O aumento da temperatura atmosférica tende a elevar a probabilidade de ignição. Ao subir a temperatura do ar, os combustíveis, especialmente os finos e mortos, tendem a perder humidade para alcançar o equilíbrio higroscópio com o ar que os rodeia, deixando-os em condições mais favoráveis para que se inicie e se propague um incêndio.

As figuras seguintes representam os dados registados na estação climatológica de Alcácer do Sal, relativamente aos valores mensais de temperatura média, média dos valores máximos e valores máximos registados para o período 1951-1980.

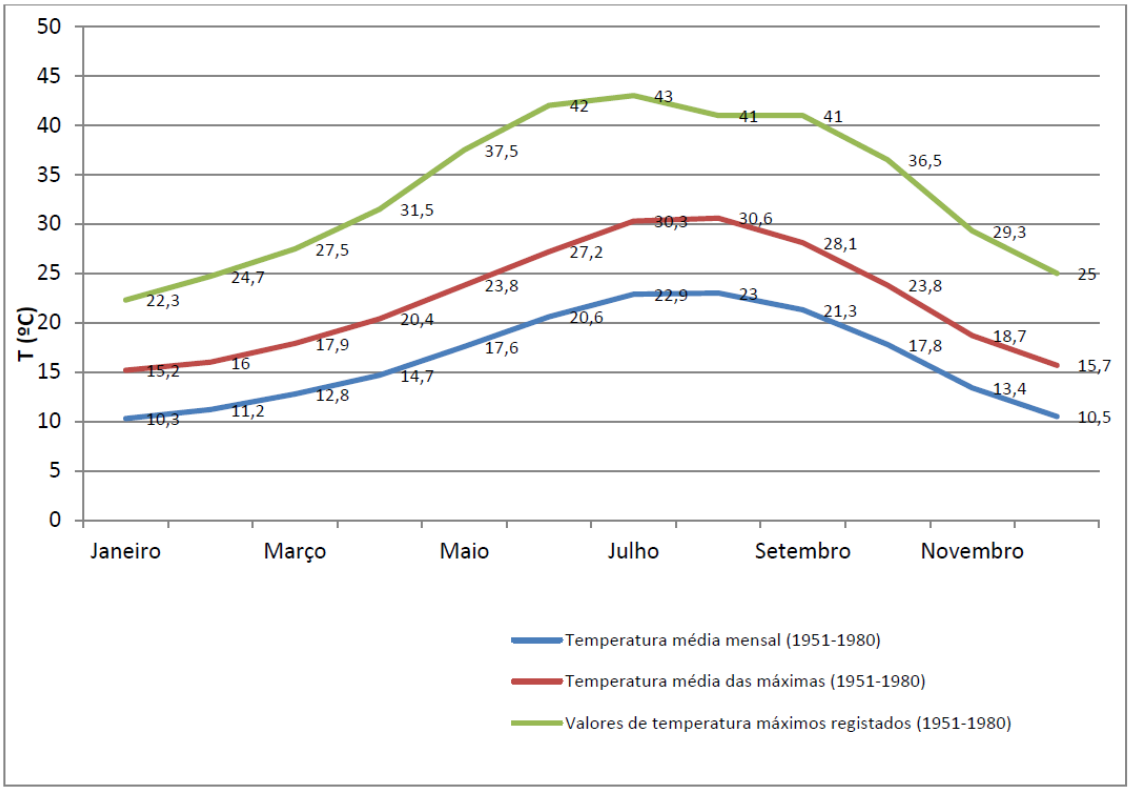


Figura 1 - Valores mensais da temperatura média do ar, média dos valores máximos e valores máximos registados na estação de Alcácer do Sal, para o período 1951-1980 (INMG, 1991).

Precipitação

Chama-se precipitação a toda a água que atinge a superfície do globo. Esta água não corresponde só à chuva e pode apresentar-se também sob a forma de granizo, neve, orvalho e geada (Lencastre & Franco, 1984). Tem um papel essencial no mundo vegetal, sendo um dos fatores ambientais mais importantes na distribuição dos vegetais.

A precipitação é fundamental para recarregar a reserva hídrica do solo e assim possibilitar o crescimento das plantas. Mas se essa precipitação se verificar com uma intensidade superior à capacidade de infiltração, verifica-se o escorrimento superficial, e surge a erosão hídrica do solo.

A variação mensal da precipitação é apresentada nos gráficos seguintes.

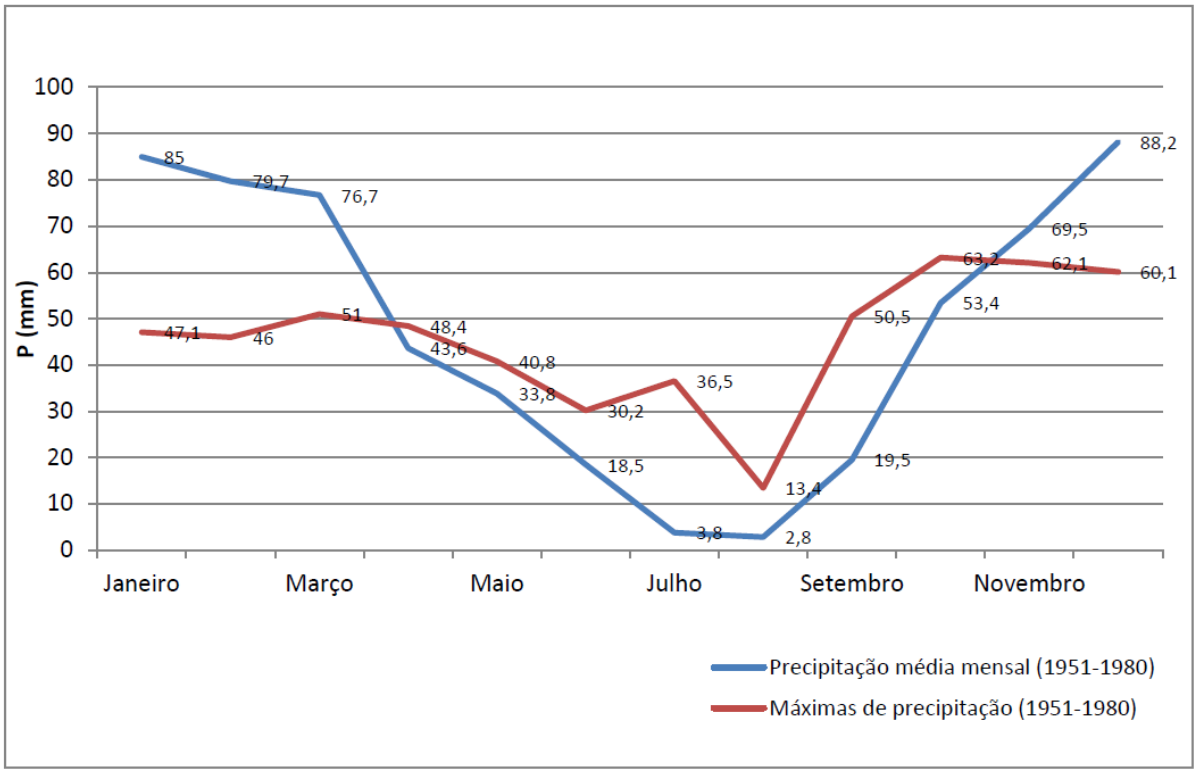
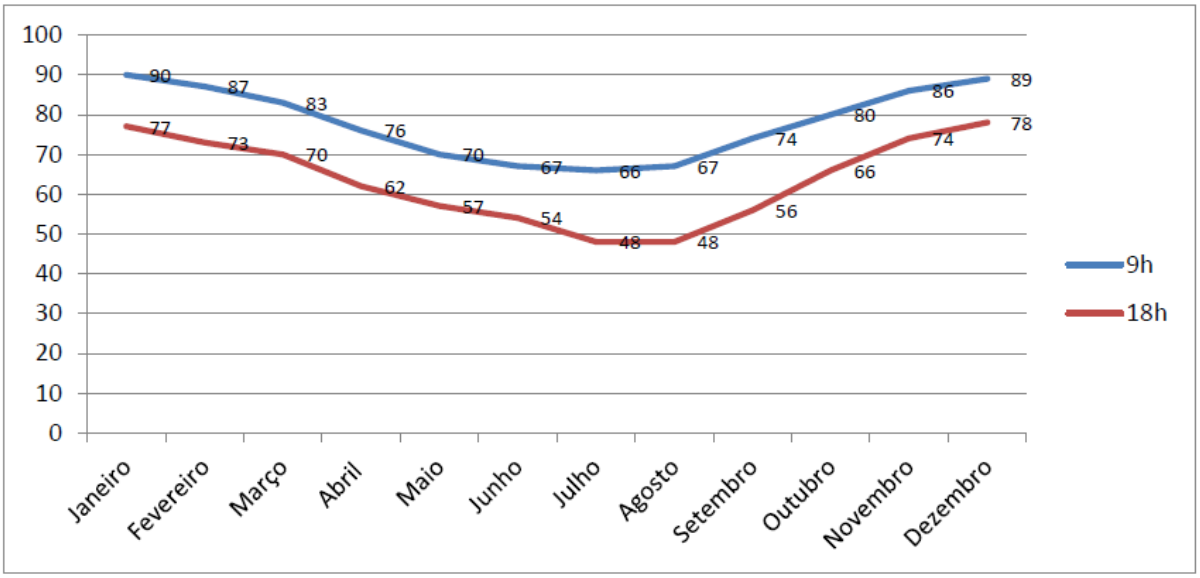


Figura 2- Valores mensais de precipitação e máximas diárias, na estação de Alcácer do Sal, para o período 1951-1980 (INMG, 1991).

Humidade relativa

A humidade relativa do ar é definida, de acordo com Lencastre & Franco (1984), como sendo o quociente da massa de vapor de água contida em determinado volume de ar húmido, pela massa de vapor de água que nele existiria se o ar estivesse saturado, à mesma temperatura.

À medida que este fator aumenta, a possibilidade de início de incêndio diminui, e dificulta a sua propagação, já que a atmosfera cede humidade aos combustíveis dificultando assim a sua combustão.



De acordo com a análise do gráfico anterior, contata-se que na estação de Alcácer do Sal os valores de menor humidade relativa média do ar são registados nos meses de julho e agosto, ou seja, nestes meses aumenta o risco de incêndio florestal.

Velocidade do Vento

O vento é um dos elementos meteorológicos que se considera fundamental analisar, uma vez que a sua ação está diretamente ligada ao efeito da precipitação sobre o solo (ângulo de incidência das gotas de chuva, exposição aos ventos pluviogénicos). Este elemento é também importante pela sua relação com a temperatura, evaporação, humidade e, inclusive pelo facto de ele próprio ser responsável por um tipo específico de erosão – erosão eólica (Roxo, 1994).

O vento aumenta a velocidade de propagação dos incêndios, já que fornece oxigénio para à combustão, transporta o ar quente, seca os combustíveis e dispersa as partículas em ignição. Por outro lado, os ventos fortes limitam a produtividade florestal; ou por diminuírem a taxa de crescimento anual, ou por poderem provocar o derrube das plantas. Nos gráficos seguintes apresentam-se os dados disponíveis, na mesma estação climatológica.

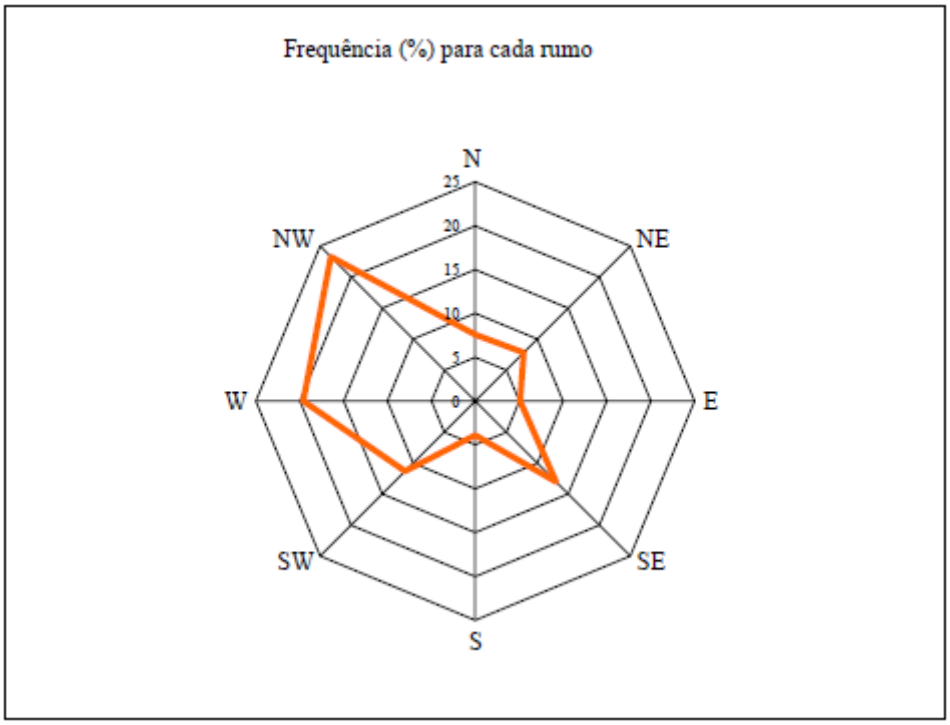


Figura 3 – Valores médios mensais da frequência do vento (%), na estação de Alcácer do Sal (INMG, 1991).

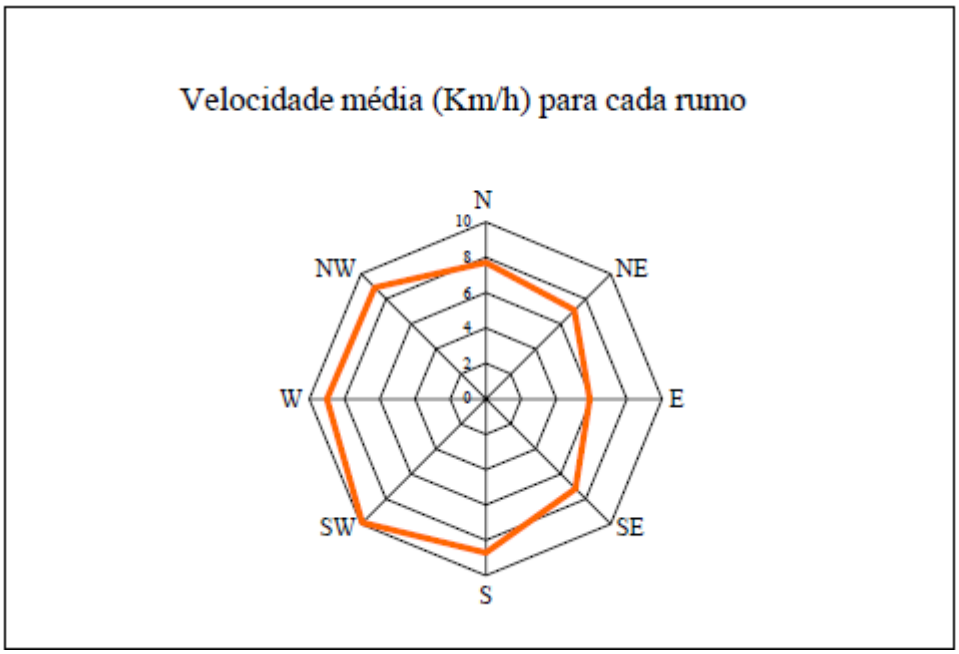


Figura 4 – Valores médios mensais de velocidade do vento (Km/h), na estação de Alcácer do Sal (INMG, 1991).

Com base nos gráficos anteriores o maior valor de frequência do vento, em percentagem, é registado a Noroeste e Oeste. A velocidade média do vento varia 5,9 km/h e 9,9 km/h, ao longo do ano, na estação meteorológica considerada, sendo mais elevada a Sudoeste.

É importante referir que o vento desempenha um papel importante na disseminação do fogo e na criação de múltiplas frentes de chama, o que poderá dificultar bastante a ação das forças de

combate. Tem um papel importante também por ser responsável pela dessecação dos combustíveis, levando a que, ainda que as temperaturas não sejam elevadas e os níveis de humidade relativa do ar sejam moderados, os combustíveis possam apresentar baixos teores em humidade, visto que o ar em movimento junto à parte aérea das plantas promove a evaporação da água nos tecidos das mesmas.

Assim, em termos DFCI para o concelho de Alcácer do Sal, existem, em média, ventos mais fortes no período em que se verifica uma maior probabilidade de ocorrência de incêndios, pelo que diminuem de modo mais intenso a humidade dos combustíveis e contribuem mais para a propagação das chamas. Mais grave ainda quando se geram correntes de ventos locais, nos grandes incêndios, afetando a progressão das chamas.

Relativamente à orientação das chamas e segundo o SMPC, o rumo mais frequente em termos médios anuais é o rumo Noroeste, seguido do Oeste.

Durante a época estival, os ventos provenientes de leste tendem a ser bastante quentes e secos, o que favorece a ocorrência de incêndios, que se poderão tornar complicados em algumas zonas declivosas. Nestas condições climáticas, torna-se imperativo cuidados acrescidos na vigilância e prevenção dos incêndios.

2.3 – SOLOS

A exploração carateriza-se por um predomínio de solos do tipo podzóis órticos, existindo ainda que com maior expressão a norte uma pequena área com solos do tipo Solonchaks gleizados, conforme se pode constar no mapa n.º 4 do anexo II.

O primeiro tipo de solo é caracterizado por serem solos pouco ou nada diferenciados, pobres, pouco profundos, com baixo teor de matéria orgânica e com fraca capacidade de retenção de água.
Os segundos são solos que possuem uma alta concentração de sais solúveis em determinadas épocas do ano, são estritamente limitados a zonas de clima árido e semiárido e a regiões costeiras em todos os tipos de clima.

Quanto à litologia apresentada no mapa n.º 5 do anexo II, podemos verificar que os solos da área em estudo são constituídos por Aluviões; areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas.

Os solos da UG apresentam uma capacidade de uso inserida nas classes “D, E e C+D ou E”, conforme a capacidade de uso do solo apresentada no mapa n.º 6 do anexo II. Estas classes caraterizam-se por:

- Classe C: solos com capacidade de uso condicionada por limitações acentuadas, capacidade de uso mediana, riscos de erosão elevados, suscetíveis de utilização agrícola pouco intensiva e outras utilizações.
- Classe E: solos com capacidade de uso muito baixa, limitações muito severas, riscos de erosão muito elevados, não suscetíveis de uso agrícola, severas e muito severas limitações

para pastagem, exploração de matos e exploração florestal. Em muitos casos, o solo não é suscetível de qualquer utilização económica.

- Classe C+D ou E: apresentam características intermédias, variando entre capacidade de uso elevada e condicionada e capacidade de uso condicionada a capacidade de uso muito baixa, respetivamente.

2.4 – Fauna, flora e *habitats*

Espécies cinegéticas	*Oryctolagus cuniculus* (Coelho-Bravo), *Lepus sp.* (Lebre), *Alectoris rufa* (Perdiz), *Anas platyrhynchos* (Pato-Real), *Gallinago gallinago* (Narceja-Comum), *Scolopax rusticola* (Galinhola), *Streptopelia turtur* (Rola-Comum), *Coturnix coturnix* (Codorniz), *Columba palumbus* (Pombo-Torcaz), *Turdus philomelos* (Tordo-Comum), *Vulpes vulpes* (Raposa), *Herpestes icnhneumon* (Saca-Rabos), *Sus scrofa* (Javali).
Espécies arbóreas e arbustivas	*Pinus pinea* (pinheiro-manso), *Pinus pinaster* (pinheiro-bravo), *Quercus suber* (sobreiro),*Eucalyptus globulus* (Eucalipto-comum), *Asparagus acutifolius, Daphne gnidum* (trovisco), *Helichrysum italicum* (perpétua-das-areias), *Phillyrea angustifolia* (aderno-de-folhas-estreitas), *Ulex australis, Stauracanthus genistoides, Corema album* (camarinha), *Gladiolus sp, Simehis mattiazi* (cravo-do-monte), *Briza maxima, Cistus salviifolius, Dittrichia viscosa* (tágueda), *Halimium halimifolium, Josione montana, Lavandula stoechas* (rosmaninho), *Thymus capitellatus, Juncus sp, Armeria rouyana* (arméria-do-sado), *Anarrhinum bellidifolium*, *Ulex minor*, *Erica ciliaris* (lameirinha), *Allium pruinatum, Ruscus aculeatus* (gilbardeira), *Cheirolophus uliginosus, Cirsium welwitschii* (cardo-dos-brejos), *Lepidophorum repandum, Anchusa calcarea subsp. calcarea, beris ciliata subsp. welwitschii, Iberis procumbens* subsp. *procumbens*, *Populus*, sp.,*Salix*, sp
Cogumelos silvestres	Não observados
Flora melífera	*Lavandula stoechas* (rosmaninho), *Erica* sp, *Eucalyptus globulus, Rosmarinus officinalis*, *Arbutus unedo* (medronheiro).
Espécies classificadas prioritárias (RN 2000)	Armeria rouyana (arméria-do-sado) e *santolina impressa* (marcetão-das-areias)
Habitats	○ 2150*- Dunas fixas descalcificadas atlânticas (*Calluno-Ulicetea*)

classificados (RN 2000)	○ 2250* - Dunas litorais com *Juniperus spp* ○ 2260 - Dunas com vegetação esclerófila da *Cisto-Lavenduletalia* ○ 2330 – Dunas interiores com prados abertos de *Corynephorus* e *Agrostis* ○ 6310 - Montados de *Quercus spp*. de folha perene. ○ 6410 - Pradarias com *Molinia* em solos calcários, turfosos e argilo-limosos (*Molinion caeruleae*)
Séries de vegetação	**Montado** *Poetea bulbosae* **Matos** *Daphno gnidii-Juniperetum navicularis* *Erico umbellatae-Ulicetum welwitschianii* *Stauracantho genistoidis-Halimietalia commutati* *Daboecion cantabricae* p.p., *Ericenion umbellatae* p.p. min e *Genistion micrantho-anglicae* *Molinietalia caeruleae* p.p. max *Koelerio-Corynephoretea* *Cisto-Lavanduletea* **Galeria Ripícola** *Salicie purpureae-Populetea nigrae* p.p.

2.5 – PRAGAS, DOENÇAS E INFESTANTES

Os danos causados por um determinado agente dependem não só da sua presença e classe de agressividade, mas também da intensidade do ataque.

A intensidade do ataque quando conjugada com a agressividade do agente permite calcular o grau de perigosidade da situação, que servirá de base na tomada de decisão e na definição de uma estratégia de intervenção.

A intensidade do ataque e o grau de perigosidade foram aferidos com base nas seguintes tabelas:

Intensidade do ataque

CLASSES (% DE ÁRVORES)	CÓDIGOS
X ≤ 0,5	1 (Vestígios)
0,5 < X ≤ 1	2 (Ataques ligeiros)
1 < X ≤ 5	3 (Ataques médios)
5 < X ≤ 10	4 (Ataques fortes)
X > 10	5 (Ataques muito fortes)

Classes de agressividade

	ESPÉCIE	CÓDIGOS	
		ÁRVORES JOVENS	ÁRVORES ADULTAS
Insetos	*Coroebus florentinus*	1	3
	Coroebus undatus	1	3
	Lymantria dispar	3	3
	Platypus cylindrus	1	4
	Thaumatopoea pityocampa	3	2
Fungos	*Armillaria* spp.	3	3
	Biscogniauxia mediterranea	3	3
	Phytophtora spp.	4	4

Legenda:

1 – Sem probabilidade de ocorrência

2 - Cria perturbações de ordem fisiológica sem grande impacte no hospedeiro

3 – Cria perturbações de ordem fisiológica levando a um enfraquecimento gradual do hospedeiro

4 – Provoca a morte do hospedeiro

Grau de perigosidade

$$Grau\ de\ Perigosidade = \frac{\sum_{n=1}^{2}(Classe\ de\ agressividade\ x\ Intensidade\ do\ ataque)}{n}$$

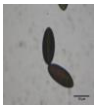
Onde:

n = n.º de classes de idade

n=1, quando o povoamento tem apenas uma classe de idade (árvores jovens ou árvores adultas)

n=2, quando o povoamento tem duas classes de idade (árvores jovens e árvores adultas)

Classe	Intervalo	Tomada de decisão
Muito perigoso	X>14	Acionar urgentemente todos os meios de luta
Perigoso	9 < X ≤ 14	Definição de uma estratégia de controlo consoante a situação
Medianamente perigoso	4 < X ≤ 9	Monitorização obrigatória
Ligeiramente perigoso	2 < X ≤ 4	Monitorização aconselhada
Não Perigoso	2 ≤ X	Não é necessária nenhuma intervenção

Nome	Ano	Classe e intervalo	Área afetada (%)	Controlo prescrito
Coroebus florentinus (Cobrilha dos ramos) 	2023	Ligeiramente perigoso (3)	5	Dada a reduzida dimensão da área afetada preconiza-se a aplicação das normas genéricas relativas à fitossanidade (anexo III) e as normas genéricas para a proteção contra agentes bióticos no montado de sobro e azinho (anexo IV). Deverá ainda realizar-se um controlo fitossanitário regular nomeadamente poda e queima de ramos atacados.
Coroebus undatus (Cobrilha da cortiça) 	2023	Ligeiramente perigoso (3)	5	Dada a reduzida dimensão da área afetada preconiza-se a aplicação das normas genéricas relativas à fitossanidade (anexo III) e as normas genéricas para a proteção contra agentes bióticos no montado de sobro e azinho (anexo IV). Deverá ser dada especial atenção às condições vegetativas do montado (fertilizações, correção do pH do solo) e redução de matos (reduzindo a competição de nutrientes).
Biscogniauxia mediterranea (Carvão do entrecasco) 	2023	Ligeiramente perigoso (4)	<5	Deverão ser seguidas as normas genéricas relativas à fitossanidade (anexo III) e as normas genéricas para a proteção contra agentes bióticos no montado de sobro e azinho (anexo IV).
Phytophthora cinnamomi	2023	Ligeiramente perigoso	5	Para as áreas afetadas, preconiza-se a aplicação do fertilizante líquido Aliette Flash®.

(Fitóftora) 		(4)		Para as restantes áreas, preconiza-se, para além das normas genéricas para proteção contra agentes bióticos no montado de sobro e azinho (anexo IV), as ações e tratamentos descritos nas normas genéricas relativas à fitossanidade (anexo III) específicos para esta doença.
Platypus cylindrus  (Plátipo)	2023	Medianamente Perigoso (6)	10	Para a área afetada, recomenda-se: • Remoção das árvores severamente atacadas antes do período de emergência dos insetos adultos; • Instalação de armadilhas com feromonas atrativas de modo a reduzir a população do inseto.
Thaumetopoea pityocampa (Processionária-do-pinheiro) 	2023	Medianamente Perigoso (6)	5	Para a área afetada preconizam-se medidas de carácter sanitário de forma a evitar a dispersão da espécie, nomeadamente: • Poda e queima de ramos atacados; • Instalação de armadilhas.
Bursaphelenchus xylophilus (Nemátodo-da-madeira-do pinheiro) 	2023	Ligeiramente perigoso (3)	5	Segundo a redação atual do Decreto-Lei n.º 95/2011, de 8 de agosto, é obrigatório: ○ Remoção de todos os exemplares das coníferas hospedeiras – dos géneros *Abies* (abetos), *Cedrus* (cedros), *Larix* (larix), *Picea* (piceas ou espruces), *Pinus* (pinheiros), *Pseudotsuga* (falsas-tsugas), e *Tsuga* (tsugas) – que apresentem copa seca ou a secar (total ou parcialmente), agulhas descoloradas e dos que estejam tombados e tenham sido afetados por tempestades ou incêndios (queimados ou parcialmente queimados); ○ Eliminação ou entrega em destino autorizado do material lenhoso e sobrantes. Recomenda-se ainda o controlo da população

	do inseto-vetor (*Monochamus galloprovinciallis*) durante o seu período de voo (abril a outubro) por meio de armadilhas e feromonas sexuais.

Espécies invasoras

Muitas das plantas que nos rodeiam foram transportadas do seu habitat natural para outros locais pelo que são denominadas plantas exóticas (do grego *exotikós*, "de fora"; ou não-nativas). Algumas destas espécies coexistem com as espécies nativas de forma equilibrada, mas outras há que se desenvolvem muito rapidamente e escapam ao controlo do Homem tornando-se nocivas – estas são designadas espécies invasoras. Além de superarem as barreiras geográficas, estas espécies conseguem superar barreiras bióticas e abióticas, mantendo populações estáveis.

Na UG foram identificadas algumas espécies exóticas invasoras, que deverão ser alvo de ações de controlo e erradicação, tanto lenhosas como herbáceas. Estas ações irão iniciar-se nos focos mais jovens e dispersos, e posteriormente terão mais ênfase nos núcleos mais densos e antigos, bem como nas margens do Açude da Murta.

No quadro seguinte identificam-se as medidas de controlo para cada espécie:

Nome	Ano	Área afetada (%)	Controlo recomendado
Acacia dealbata (Acácia mimosa) 	2023	1	Realização de controlo mecânico, que promova a estabilização do seu núcleo, nomeadamente através do arranque das plantas jovens com a raiz inteira. Descasque da árvore adulta, deixando secar totalmente, e só depois proceder ao corte da árvore. A secagem pode demorar vários meses a alguns anos.
Acácia longifolia (Acácia de espigas) 	2023	5	Arranque manual de plântulas e plantas jovens; em plantas adultas cortar tão rente ao solo quanto possível, antes da maturação das sementes.
Arundo donax (Canas) 	2023	2	Arranque manual de plantas jovens (até 2m de altura), garantindo que não ficam rizomas e / ou fragmentos de rizomas no solo. Realização de cortes suscessivos, levam a que os rizomas se tornem incapazes de emitir novas plantas.

Opuntia ficus-indica (Figueira da Índia) 	2023	1	Controlo Físico - Arranque manual/ mecânico antecedido ou não de corte dos caules. Deve garantir-se que não ficam frutos, raízes de maiores dimensões e fragmentos de cladódios no solo. Controlo Manual – Infeção de herbicida nos caules, antes de desenvolvimento do fruto.

2.6 – INCÊNDIOS FLORESTAIS, CHEIAS E OUTROS RISCOS NATURAIS

Registo de incêndios

Segundo a informação disponibilizada pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, para o período de 1990 a 2022, foram registados dois incêndios na UG:

Ano	Área consumida (ha)
2002	482,56
2010	195,56

Verifica-se que o incêndio de 2002 consumiu uma área superior à de 2010, tendo no primeiro sido consumidas florestas de resinosas e folhosas, nomeadamente pinheiro bravo, pinheiro manso e sobreiro. No incêndio de 2010, foi consumida uma área composta somente por resinosas, pinheiro bravo e pinheiro manso (Ver mapa n.º 11 do anexo II).

A perigosidade de incêndio encontra-se maioritariamente nas classes “Baixa e Muito Baixa”, conforme se verifica no mapa n.º 8 do anexo II. Esta situação é devida principalmente ao fato de existir relativamente pouca continuidade horizontal e vertical de combustíveis, conforme se pode ver no quadro seguinte:

Distribuição da Massa Combustível	Sim/Não	Parcela de gestão florestal
Continuidade de combustíveis	Sim	---
Continuidade vertical de combustíveis	Sim	B.2.1
Continuidade horizontal de combustíveis	Não	---
Áreas contíguas com gestão DFCI	Não	---

Perigosidade de incêndio (% em cada classe)	**I**	25,74	**II**	53,82	**III**	2,30
	IV	18,13	**V**	-		

Zona crítica	**Sim**		**Não**	X

A qualidade da paisagem é um atributo intrínseco da UG, e a sua fragilidade depende do tipo de atividade que se desenvolve. O valor paisagístico da exploração é intermédio, pode apresentar condições que favoreçam a propagação de incêndios, em função das características do material de combustíveis provenientes da cobertura vegetal, relevo e condições meteorológicas. Uma paisagem degradada é um ambiente frágil, podendo permitir a ação de agentes externos, como a erosão, as pragas e o fogo. Existe uma correlação entre a qualidade da paisagem e o risco de incêndios florestais, sugerindo que a valoração da qualidade da paisagem poderá ser uma ferramenta importante para a zona de risco de incêndios.

Registos de outros riscos naturais

Deslizamento de terras	Cheias	Outros
Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável

3 – REGIMES LEGAIS ESPECÍFICOS

3.1 – RESTRIÇÕES DE UTILIDADE PÚBLICA

Condicionantes

	Sim	Não	Superfície ha	Superfície %	Descrição das condicionantes
Regime florestal:		X			---
REN:	X		42,35	1,77	A UG apresenta cursos de água e respetivos leitos e margens (36,84 ha); sapais (0,14 ha); zonas ameaçadas pelas cheias não classificadas como zonas adjacentes nos termos da Lei da Titularidade dos recursos hídricos (2,88 ha); águas de transição e respetivos leitos, margens e faixas de proteção (2,48 ha); A todas estas áreas deve aplicar-se a legislação em vigor, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 166/2008, de 22 de agosto.
RAN:	X		233,88	9,75	Deverá ser aplicada a legislação em vigor, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 73/2009, de 31 de março, e nº 162/2011, de 18 de abril. Este documento estabelece um conjunto de condicionamentos à utilização não agrícola do solo, identificando quais as permitidas, tendo em conta os objetivos do novo Regime Jurídico da RAN, nos vários tipos de solos.
Rede Natura 2000:	X		2399,29	100	A exploração objeto deste PGF encontra-se inserida na Rede Natura 2000, mais propriamente nas Zonas especiais de conservação Comporta/Galé (Código PTCON0034), Estuário do Sado (PTCON0011) e nas Zonas de Proteção Especial do Açude da Murta (PTZPE0011) e do Estuário do Sado (PTZPE011), classificadas através da Resolução do Concelho de Ministros nº 142/97, de 28 de agosto D.R. n.º 198, Série I-B Os habitats identificados estão protegidos pelo anexo B-I do Decreto-Lei nº156-A/2013 de 8 de novembro (que procede à segunda alteração do Decreto-Lei nº

				140/99, de 24 de abril).
Outras áreas classificadas:	X			---
Linha elétrica de média tensão:	X	5327,76 m (FGC – 7,17 ha)	0,30	Conforme o artigo 15º da Secção II do Decreto-Lei n.º 124/2006, de 28 de junho, pelas linhas de transporte e distribuição de energia elétrica em média tensão deverá providenciar-se a gestão do combustível numa faixa correspondente à projeção vertical dos cabos condutores exteriores, acrescidos de uma faixa de largura não inferior a 7 m para cada um dos lados.
Oleodutos/ gasodutos:		X (FGC- 3,39)	0,14	O prédio Monte Novo é atravessado por uma rede de gás (gasoduto), encontrando-se essa área expropriada. Na UG encontra-se implementada uma Faixa de gestão de combustíveis em redor desta infraestrutura.
Marcos geodésicos:	X	(FGC – 0,07 ha)	0,00	Na UG encontra-se implantada a seguinte rede geodésica: • Olhos de água Cumpre-se o Decreto-Lei n.º 143/82, de 26 de abril.
Sítios arqueológicos:	X	(FP – 0,20 ha)	0,01	Existem dois sítios arqueológicos, identificados pela Direção Geral do Património Cultural (DGPC), conforme se encontra representado no mapa nº 9_1 do anexo II. Encontram-se identificados com os códigos CNS- 16974 e o CNS-38635. No primeiro local foi identificada cerâmica rolada à superfície e no segundo um moinho da Idade Moderna, situado em cerro elevado junto ao Estuário do Sado, que assenta numa torre atalaia, datada do Período Islâmico, de planta circular e com diâmetro de 8 metros. Como medida de proteção, deverá ser criado um sistema de demarcação física com fita sinalizadora, de forma a restringir a área a ações florestais, à circulação de máquinas e pisoteio, interferindo o mínimo possível com o sítio, averiguação do estado de conservação dos sítios por arqueólogo, acompanhamento arqueológico das operações que impliquem a mobilização/ revolvimento de solos/subsolos e na limpeza de matos e promoção de ações de sensibilização

				ambiental para os trabalhadores envolvidos no processo. Em torno deste local, deverá ser providenciada uma faixa de proteção com a largura de 7 m.
Outros:	X	442,99	18,46	Corredor ecológico (ver anexo VII)
Outros:	X	271,71	11,33	Área de proteção e restauro, definidas no Estudo de Impacto Ambiental: • Densificação dos núcleos de flora com elevado valor de conservação (*Armeria rouyana, Thymus capitellatus* e *Santolina impressa*) através de sementeira, na área mais a sudoeste; • Melhorar o estado de conservação do Habitat 2260, através da conservação das suas espécies características (*Stauracanthus genistoides, Halimium halimifolium, Halimium calycinum* e *Calluna vulgaris*). Recolha de sementes e/ou transplantação de indivíduos.
Outros:	X	184,47	7,68	Perímetro de rega do Vale do Sado - Deverá ser cumprido o estipulado no Decreto-Lei nº269/82, de 10 de julho, na redação dada pelo Decreto-Lei nº 86/2002 de 6 de abril, designadamente as disposições do artº 95º.

Nota: A cartografia referente às restrições de utilidade pública é apresentada no mapa n.º 9_1 e mapa 9_2 do anexo II.

Tipo de área classificada:

Zona Especial de Conservação (ZEC)	Zona de Proteção Especial (ZPE)
Comporta-Galé (PTCON0034)	Açude da Murta (PTZPE0011)
Estuário do Sado (PTCON0011)	Estuário do Sado (PTZPE011)

3.2 – INSTRUMENTOS DE PLANEAMENTO FLORESTAL

PROF	PMDFCI	ZIF
Alentejo		
SRH: Pinhais do Alentejo Litoral e Estuário e Vale do Baixo Sado (ver mapa n.º 10 do anexo II)	Alcácer do Sal	Não aplicável

3.3 – INSTRUMENTOS DE GESTÃO TERRITORIAL

PMOT	PEOT
O Plano Diretor Municipal de Alcácer do Sal publicado pelo Aviso n.º 13020/2017, Diário da República n.º 209/2017, Série II de 2017-10-30 teve a sua segunda alteração aprovada pelo Aviso n.º 11125/2020, de 31 de julho.	Não aplicável

PROT - Plano Regional de Ordenamento do Território

A UG está inserida no PROT do Alentejo (PROTA), podendo ser enquadrada na caracterização abaixo mencionada.

Segundo o Modelo de Ordenamento do Território foi definido ordenar os espaços rurais, nomeadamente agrícolas e florestais, de forma a salvaguardar os recursos hídricos e o uso racional e eficiente da água.

No capítulo III do PROTA são referidas as Opções Estratégicas de Base Territorial, nas quais se enquadram:

OEBT II.1 — Cumprir as metas ambientais, garantindo a manutenção e valorização da biodiversidade através de uma integração sólida entre a gestão dos sistemas naturais, em especial nas áreas classificadas para a conservação da natureza, e as oportunidades que se oferecem às atividades produtivas.

No Sexto Programa de Ação em matéria do Ambiente da Comunidade Europeia, “Ambiente 2010: o nosso futuro, a nossa escolha”, a Natureza e a Biodiversidade são estabelecidos como alvos prioritários de atuação.,. A salvaguarda dos habitats e das espécies constitui um dos objetivos estratégicos fundamentais do espaço europeu. Embora as áreas classificadas constituam as zonas nucleares para a conservação da biodiversidade, a manutenção do estado de conservação favorável

de espécies e habitats está fortemente dependente das interações que se estabelecem com a matriz em que elas se inserem e, nomeadamente, da existência de uma rede de conectividade funcional. A sua concretização está dependente da aplicação da Rede Fundamental de Conservação da Natureza.

A gestão das áreas nucleares de conservação da natureza e da biodiversidade assenta na obrigação de conservar os valores naturais que levaram à sua classificação, quer das Áreas Protegidas e, de cada Zona Especial de Conservação (ZEC) e Zonas de Proteção Especial (ZPE), no Plano Sectorial da Rede Natura 2000. Estas áreas são elementos essenciais de qualquer estrutura ecológica, à escala regional ou municipal, constituindo espaços privilegiados para promover a informação, a sensibilização e a formação em matéria de ambiente, de forma a mobilizar a participação pública na sua gestão. A preservação do património natural deve ainda permitir potenciar o reforço dos sinais de identidade das comunidades rurais das áreas classificadas.

3.4 – OUTROS ÓNUS RELEVANTES PARA A GESTÃO

Regime cinegético

De momento a UG encontra-se inserida em duas zonas de caça turísticas, a ZCT 5725 - Monte Novo do Sul e a ZCT – 7830 - Herdade da Murta

Tipo de regime cinegético:	ZCT	**N.º Zona de Caça:**	5725 7830

Pelo Despacho n.º 671/2023, de 20 de novembro, a concessão da zona de caça turística do Monte Novo do Sul (processo n.º 5725-ICNF) é transferida para a Terrainovacão, S.A., com o número de identificação fiscal 517032449, a zona de caça turística do Monte Novo do Sul (processo n.º 5725-ICNF), situada no concelho de Alcácer do Sal, tem uma área total de 906 hectares.

Pelo Despacho n.º 664/ 2023 de 20 de novembro, é concessionada à Terrainovação, S.A. pessoa coletiva n.º 517032449, por um período de 12 anos, renováveis automaticamente, sem prejuízo do disposto no n.º 1 do artigo 48.º do citado decreto-lei, a zona de caça turística da Herdade da Murta (processo n.º 7830-ICNF), com uma área de 1246 hectares.

Medidas previstas para o fomento e conservação do património cinegético:

Tipos de ações possíveis a desenvolver	Observações
Ações de melhoria do habitat	Conciliar os trabalhos agrícolas, sem prejuízo da própria cultura com o mínimo de prejuízo das espécies existentes. Serão semeadas algumas parcelas de terreno, com consociações de tremocilha, aveia, centeio, triticale e serradela. Prevê-se a instalação de algumas parcelas de girassol visando o fomento das rolas. O fornecimento de grão de cereais nas épocas do ano de maior carência também está previsto.
Ações de melhoria do Coberto	No sentido de fomentar a população de coelhos serão feitos alguns morouços de lenha entre as manchas de coberto arbustivo e os campos de alimentação.
Ações de melhoria da água	Serão instalados bebedouros, conjugados com as áreas de alimentação.
Correção da densidade de espécies cinegéticas prejudiciais à caça, pesca e agricultura, de acordo com as condições definidas nos artigos 113.º do D.L. 202/2004 de 18 de agosto, republicado pelo D.L. 2/2011 de 6 de janeiro	Sendo a densidade de javalis elevada na propriedade em algumas épocas do ano, a correção de densidade de população será realizada durante todo o ano, pelos processos de espera em períodos de lua cheia e de batida e montaria nos meses de outubro a fevereiro como o recurso a armas classificadas como de caça.
Censos de populações	**Censos de Perdizes** Serão feitos em 3 fases; 1ª Censo de casais (fev./mar.); 2ª Censo de juvenis (julho); 3ª Censo de Bandos (setembro). **Censos de Lebre** Serão feitas 'batidas em seco' no mês de setembro, a fim de ter uma ideia do quantitativo de lebres existentes. **Censo de Coelhos** Será realizado no princípio de junho e segunda quinzena de setembro nas áreas onde são mais frequentes

Espécies cinegéticas objeto de exploração, processos e meios de caça:

Espécie	Processo	Meios
Coelho bravo	S/E	1/2/7
Lebre	S	1/2
Perdiz	S	1/2
Pato-real	E	1
Narceja-comum	S/E	1/2
Galinhola	S	1/2
Rola Comum	E	1
Codorniz	S	1/2
Pombo-torcaz	S/E	1/3
Tordo-comum	S/E	1
Raposa	S/B/M	1/2/4
Saca-rabos	S/B	1/2/4
Javali	S/E/B/M	1/2

Legenda: A- Aproximação; B- Batida; E- Espera; M- Montaria; S- Salto. 1- Arma de Caça 2- Cães; 3- Negaças (vivas ou artificiais); 4- Batedores.

Períodos de caça:

Mês / Espécie	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Coelho bravo									■	■	■	■
Lebre									■	■	■	■
Perdiz										■	■	■
Pato-real	■							■	■	■	■	■
Narceja-comum	■									■	■	■
Galinhola	■									■	■	■
Rola Comum								■	■			
Codorniz									■	■	■	■
Pombo-torcaz	■	■						■	■	■	■	■
Tordo-comum	■	■								■	■	■
Raposa	■	■								■	■	■
Saca-rabos	■	■								■	■	■
Javali	**M/E**	**M/E**	**E**	**E**	**E**	**E**	**E**	**E**	**E**	**M/E**	**M/E**	**M/E**

E- Espera; M- Montaria

Contratos de arrendamento

Atualmente, existe um contrato de arrendamento em vigor com um particular para a parcela A.1.1, que é destinada ao cultivo de arrozais. Este contrato foi celebrado em 29 de março de 2026 e tem uma duração de um ano. Portanto, nesta área, a cultura de arroz continuará a ser cultivada conforme acordado no referido contrato.

Outros contratos/protocolos

Apicultura

Encontram-se cedidos locais da UG onde é explorada a apicultura. No entanto, atualmente não temos a informação exata sobre a localização desses apiários.

4 – CARACTERIZAÇÃO DOS RECURSOS

4.1 – INFRAESTRUTURAS FLORESTAIS

4.1.1 – REDE VIÁRIA FLORESTAL

Breve descrição da RVF:	Não se encontra identificada no PMDFCI de Alcácer do Sal a rede viária florestal. No entanto, foram assinalados mais alguns caminhos florestais marcados com base no ortofotomapa e por levantamento de campo, sendo o total da rede viária florestal de 226809,41 m, conforme consta no mapa n.º 17 do anexo II.

Densidade:	0,094 km/ha

Segundo Bernardo (1992), *in* Almeida *et al*. (1995), é considerado que existe uma densidade ótima de caminhos quando a densidade é de aproximadamente 30 m/ha. Tendo em conta que a densidade de caminhos da UG é de 94 m/ha, existe apenas a necessidade de beneficiação dos caminhos existentes.

Caracterização da rede viária existente:

Existência	Presente	Ausente	
Análise qualitativa	Transitável	Transitável em parte	Não transitável
Análise quantitativa	Suficiente	Insuficiente	

4.1.2 – ARMAZÉNS E OUTROS EDIFÍCIOS ASSOCIADOS À GESTÃO

Observações:	A UG tem infraestruturas de apoio à gestão com cerca de 1,5 ha, pretendem-se construir infraestruturas de apoio com uma área de 0,35 ha, conforme se verifica no mapa n.º 12 do anexo II.

4.1.3 – INFRAESTRUTURAS DFCI

Faixas de Gestão de Combustíveis

REDES PRIMÁRIAS:

Não	X	**Planeadas (ha)**	-
Sim		**Executadas (ha)**	-

Ocupação e medidas de execução:	Segundo a informação disponibilizada no PMDFCI de Alcácer do Sal, não estão previstas FGC de rede primária na UG.

REDES SECUNDÁRIAS:

Não		**Planeadas (ha)**	40,34
Sim	X	**Executadas (ha)**	

Ocupação e medidas de execução:	Segundo a informação disponibilizada no PMDFCI de Alcácer do Sal estão previstas as seguintes FGC da rede secundária: • Edificações – 12,49 ha; • Rede viária – 17,16 ha; • Rede de gás – 3,39 ha; • Rede elétrica de média tensão – 7,17 ha; • Infraestruturas a construir – 0,06 ha; • Rede geodésica – 0,07 ha; (ver mapa 11 do anexo II).

REDES TERCIÁRIAS:

Não		**Planeadas (ha)**	37,98
Sim	X	**Executadas (ha)**	-

Ocupação e medidas de execução:	Apesar de não estarem previstas FGC de rede terciária no PMDFCI de Alcácer do Sal, irá ser criada rede divisional com uma extensão de 54 250,16m com largura média de 7m (ver mapa 11 do anexo II).

MOISAICOS DE GESTÃO DE COMBUSTÍVEIS:

Não		**Planeadas (ha)**	-
Sim	X	**Executadas (ha)**	2,26

Ocupação e medidas de execução:	Segundo a informação disponibilizada no PMDFCI de Alcácer do Sal estão previstos Moisaicos de Gestão de combustíveis com uma área de 2,26 ha.

FAIXAS DE PROTEÇÃO DE LOCAIS ARQUEOLÓGICOS:

Não		**Planeadas (ha)**	-
Sim	X	**Executadas (ha)**	0,39

Ocupação e medidas de execução:	Segundo a informação disponibilizada no PMDFCI de Alcácer do Sal está prevista uma faixa de proteção dos locais arqueológicos. Em torno deste local, deverá ser providenciada uma faixa de proteção com a largura de 7 m.

Caracterização da rede divisional existente

A rede divisional visa essencialmente assegurar a compartimentação da floresta para efeitos de gestão, e secundariamente, a acessibilidade aos espaços florestais, apresentando um importante papel no âmbito da defesa da floresta contra incêndios como faixas de gestão de combustível. É composta por faixas corta-fogos, as quais correspondem quer a faixas sem coberto arbóreo onde se

realiza periodicamente a limpeza da vegetação espontânea (aceiros sem vegetação), quer faixas onde é mantida vegetação arbórea com menos densidade e é efetuado o controlo do desenvolvimento do estrato arbustivo (aceiros com vegetação).

Os aceiros têm uma largura média de 7 metros, sempre que o terreno e a ocupação assim o permitam, e a sua densidade excede os 20m/ha de densidade aconselhados pela Comissão de Acompanhamento de Operações Florestais (CAOF).

Existência	Presente	Ausente	
Estado de conservação	Bom	Razoável	Mau
Análise quantitativa	Suficiente	Insuficiente	

PONTOS DE ÁGUA:

Os pontos de água consistem em estruturas de armazenamento de água, tais como pequenas barragens, tanques de alvenaria ou betão, reservatórios metálicos e charcas escavadas com ou sem revestimento. O objetivo de algumas destas infraestruturas é o combate a incêndios florestais e em simultâneo contribuir para o aumento das potencialidades intrínsecas e de biodiversidade associadas aos vários estratos de vegetação, quer sejam florestais, agroflorestais ou agrícolas. As alterações dos meios bióticos que lhe estão associadas têm repercussões ao nível da fauna e flora, proporcionando uma maior capacidade de acolhimento e fixação das mesmas, em particular das espécies com maior dependência dos meios hídricos.

Existência:

Não	
Sim	X

N.º de pontos de água: 1

Tipo:

Estruturas fixas

Não	
Sim	X

Tomadas de água: 0

Planos de água

Não	
Sim	X

Estado de conservação	Bom	
	Razoável	X
	Mau	

Acessibilidade por meios terrestres:	Todo o tipo de viaturas	X
	Viaturas todo-o-terreno	
	Inacessível	

Acessibilidade por meios aéreos:	Acessível	X
	Inacessível	

A construir:

Não	
Sim	X

N.º de pontos de água: 3

(Ver mapa n.º 12 do anexo II)

REDE DE VIGILÂNCIA E DETEÇÃO DE INCÊNDIOS

Postos de vigia	Não	X	**Trilhos de vigilância**	---
	Sim			

Locais estratégicos de estacionamento	Não	X
	Sim	

4.1.4 – INFRAESTRUTURAS DE APOIO À GESTÃO CINEGÉTICA

Infraestruturas de fomento:	Não foram observados quaisquer tipos de infraestruturas de fomento.

Infraestruturas de compatibilização:	Não foram observados quaisquer tipos de infraestruturas de compatibilização com a gestão cinegética.
Infraestruturas de apoio à atividade venatória:	Não foram observadas infraestruturas de apoio à atividade venatória.

4.1.5 – INFRAESTRUTURAS DE APOIO À GESTÃO SILVOPASTORIL

Observações:	Não aplicável na UG.

4.1.6 – INFRAESTRUTURAS DE APOIO AO RECREIO E TURISMO

Observações:	Não existem infraestruturas de apoio ao recreio e turismo.

4.2 – CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÓMICA

O setor florestal é um setor chave da economia nacional. Os seus principais indicadores demonstram uma vocação florestal dos territórios e a subsequente valorização económica das suas produções. A região PROF-ALT, onde se enquadra a UG, embora tenha uma elevada ocupação do seu território por espaços florestais, tal realidade não se traduz em riqueza criada na região. As atividades transformadoras de base florestal são muito incipientes, o que também acontece na geração de emprego, onde o maior contingente é consequência da concentração em atividades de silvicultura e exploração florestal.

A região PROF-ALT, embora servida por uma rica composição de espécies e de áreas de grande dimensão, não gera riqueza económica direta relevante, bem como o emprego gerado é de baixo nível tecnológico e técnico. A baixa intensidade das operações florestais e a fraca ocorrência de indústrias transformadoras, associado a muito baixas densidades populacionais, de escolaridade e, sobretudo, o acentuado envelhecimento, condicionam as expectativas para o desenvolvimento do setor florestal nesta região.

Para lá da dimensão económica e social relevante do setor florestal, há a realçar ainda o papel fundamental que o setor tem para a criação e desenvolvimento do capital natural da região (ENF,

2015). A floresta é um recurso natural renovável onde as atividades florestais contribuem positivamente e potenciam um modelo de desenvolvimento sustentável da região, pela integração dos componentes intangíveis como os elementos sociais, culturais e ambientais. Além disso, o setor florestal contribui igualmente para o reforço da identidade regional e para a manutenção e proteção dos valores naturais, sociais e culturais da região (AIFF, 2013).

A UG enquadra-se no nas Sub-Regiões Homogéneas Pinhais do Alentejo Litoral e Estuário e Vale do Baixo Sado ver mapa n.º 10 do anexo II). Tendo em conta que a área afeta á SRH Estuário e Vale do Baixo Sado coincidir essencialmente com área agrícola, o enquadramento será somente realizado para a SRH Pinhais do Alentejo Litoral..

SRH Pinhais do Alentejo Litoral

Pontos fortes	Pontos fracos
Elevada proporção da área florestal	Reduzida dimensão da propriedade.
Elevada aptidão para o sobreiro, pinheiro bravo, pinheiro manso e eucalipto.	Ocorrência de grandes manchas florestais monoespecíficas contínuas.
Existência de áreas com bom potencial para a produção de produtos não lenhosos – pinhão, cogumelos silvestres e ervas aromáticas.	Elevada probabilidade de ocorrência de fogos florestais.
Elevada diversidade potencial de espécies.	Presença de pragas e doenças florestais.
	Ausência de gestão ou gestão incipiente dos espaços florestais numa proporção considerável dos espaços florestais.
	Área significativa com risco médio de erosão.

A importância das potencialidades e condicionantes da SRH reflete-se nas funções principais desta sub-região, apresentando-se de seguida:

- Conservação;
- Produção;
- Proteção.

A UG apresenta um conjunto de funcionalidades possíveis de serem realizadas. Do leque das funções principais, destacam-se as enumeradas de seguida. A cartografia referente à caracterização socioeconómica é apresentada no mapa n.º 13 do anexo II, onde é apresentada apenas a função dominante para cada unidade de gestão.

4.2.1 – FUNÇÃO DE PRODUÇÃO

O pinheiro bravo, pinheiro manso e o sobreiro são as espécies florestais presentes na UG que garantem a função de produção, pelo que estão presentes as seguintes produções:

Produção de madeira (PD 1):

- Condução dos povoamentos (PD 12);
- Proteção da regeneração natural e das plantações (PD 13).

Produção de cortiça (PD 2):

- Condução do montado e sobreiral (PD21).

Produção de fruto (PD 4):

- Condução de povoamentos florestais para a produção de fruto (PD41).

4.2.2 – FUNÇÃO DE PROTEÇÃO

A UG exibe linhas de água sazonais, incluindo o açude da Murta, cercado por uma área circundante de características nitidamente ripícolas, onde a vegetação marca presença nas margens. Além disso, há planos para estabelecer uma cortina de abrigo na zona sul da N253, assim como uma faixa de proteção ao redor de um ponto de água a construir.

A função de proteção será assegurada pela **proteção da rede hidrográfica (PT 1)** e **pela proteção microclimática (PT 3)**, através das seguintes normas:

- PT12 - Condução de povoamentos nas galerias ripícolas.
- PT31 - Instalação de cortinas de abrigo.

4.2.3 – FUNÇÃO DE CONSERVAÇÃO

A UG está completamente integrada na Rede Natura 2000, uma rede ecológica de âmbito europeu decorrente da Diretiva n.º 79/409/CEE, do Conselho, datada de 2 de abril (Diretiva Aves), modificada pelas Diretivas n.os 91/244/CEE, da Comissão, de 6 de março, 94/24/CE, do Conselho, de 8 de junho, e 97/49/CE, da Comissão, de 29 de junho. Além disso, a UG é regulada pela Diretiva n.º 92/43/CEE, do Conselho, de 21 de maio (Diretiva Habitats), com as alterações introduzidas pela Diretiva n.º 97/62/CE, do Conselho, de 27 de outubro.
Em termos de localização, a UG encontra-se na Zona Especial de Conservação (ZEC) Comporta/Galé (PTCON0034) e na ZEC Estuário do Sado (PTCON0011). Adicionalmente, está

incluída na Zona Especial de Proteção (ZPE) do Açude da Murta (PTZPE0012) e na ZPE do Estuário do Sado (PTZPE 0011). Além disso, é atravessada parcialmente por um corredor ecológico.
Assim, a UG desempenha um papel essencial na conservação de habitats classificados (**CONS 1**), Conservação de espécies da flora e da fauna protegida (**CONS 2**) e na preservação dos recursos genéticos (CONS 4), com os seguintes objetivos de gestão:

- Fomento e manutenção de habitats de grande valor natural (CONS 11);
- Ordenamento florestal para a conservação da flora e fauna (CONS21);
- Conservação de núcleos florísticos de elevado valor natural (CONS22);
- Conservação e fomento de habitats para a fauna com valor de conservação (CONS23);
- Manutenção da diversidade genética dos povoamentos florestais (CONS 41).

As medidas de gestão propostas e as áreas selecionadas apresentam-se na página 56 deste documento.

4.2.4 – FUNÇÃO DE SILVOPASTORÍCIA, CAÇA E PESCA

A função de suporte da silvopastorícia e caça está presente na UG da seguinte forma:

Suporte à caça e conservação das espécies cinegéticas **(SILV 1):** como já foi referido, o prédio de Monte Novo do Sul está inserido numa zona de caça turística, pelo que se prevê a aplicação da seguinte norma de gestão:

- SILV 11 - Melhoria das condições de habitat, alimentação e proteção.

4.2.5 – FUNÇÃO DE RECREIO E VALORIZAÇÃO DA PAISAGEM

Não aplicável na UG.

4.2.6 – ÁREAS FLORESTAIS SENSÍVEIS

A UG encontra-se inserida em áreas florestais sensíveis, nomeadamente em áreas suscetíveis a pragas e doenças, áreas com perigosidade de incêndio alta e muito alta, e ecossistemas florestais de elevado valor natural. Assim, deverão ser aplicadas as seguintes normas específicas para estas áreas:

- ZCSE 12 – Importância Ecológica
- ZCSE 14 - Perigosidade de incêndio florestal;
- ZCSE 15 – Suscetibilidade a pragas e doenças.

O presente plano terá em consideração as normas apresentadas e irá orientar as suas operações de modo a ter como objetivo o aumento da resiliência destes espaços florestais. A cartografia referente as Áreas Florestais sensíveis é apresentada no mapa n.º 7 do anexo II.

4.2.7 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA GESTÃO

A UG é composta essencialmente por pinheiro manso, pinheiro bravo, sobreiro e exemplares muito dispersos de eucalipto. O subcoberto é constituído por matos de baixa densidade. De seguida se apresentam as produções desde que o atual proprietário adquiriu a propriedade:

Ano	Produto/serviço	Quantidade
2024	Cortiça	1300@
2025	Pinha	16 ton
2026	Pinha	5,5 ton

B - Modelo de Exploração

Adequação ao PROF

PROF:	Alentejo	SRH:	Pinhais do Alentejo Litoral Estuário e Vale do Baixo Sado

Adequação ao PROF

O PROF do Alentejo foi aprovado pela Portaria n.º 54/2019, de 11 de janeiro, e engloba agora as anteriores regiões do Alto Alentejo, Alentejo Central, Alentejo Litoral e Baixo Alentejo.

Estas áreas abrangidas pelos anteriores PROF são suficientemente homogéneas e partilham, em larga medida, os mesmos potenciais e condicionantes ao nível do aproveitamento e da gestão dos espaços florestais. Contudo, procurou-se conservar uma relação com os PROF agora aprovados, através da utilização do conceito de sub-região homogénea, mantendo-se a respetiva delimitação relativamente estável, ainda que com os necessários ajustamentos.

Contribuição para os objetivos gerais e estratégicos do PROF

O Plano de Gestão Florestal tende a contribuir para os objetivos gerais do PROF do Alentejo nos seguintes pontos:

- Aumentar a resiliência dos espaços florestais aos incêndios;
- Aumentar a resiliência dos espaços florestais relativa a riscos bióticos;
- Controlar e mitigar os processos associados à desertificação;
- Promover a melhoria da gestão florestal;
- Aperfeiçoar a transferência do conhecimento técnico e científico mais relevante para as entidades gestoras de espaços florestais;
- Promover a conservação e valorização dos valores naturais e paisagísticos;

Contribuição para os objetivos específicos da SRH pinhais do Alentejo Litoral

O presente Plano de Gestão Florestal da UG enquadra-se no seguinte objetivo específico da SRH Pinhal do Alentejo Litoral:

- Ordenamento dos espaços florestais de Conservação de modo a assegurar o seu usufruto regulado.

Espécies florestais a privilegiar

Aptidão Boa e Regular numa área ≥ 50%	Aptidão Boa e Regular numa área reduzida
Alfarrobeira (*Ceratonia siliqua*)	Azinheira (*Quercus rotundifolia*)
Eucalipto (*Eucalyptus* spp.*)*	Carvalho-português *(Quercus faginea,*
Medronheiro *(Arbutus unedo)*	Preferencialmente *Q. faginea* subsp. *broteroi)*
Pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*)	Carvalho-negral (*Quercus pyrenaica*)
Pinheiro-manso *(Pinus pinea)*	Cipreste-comum (*Cupressus sempervirens*)
Sobreiro (*Quercus suber*)	Cipreste-da-califórnia (*Cupressus macrocarpa*)
Ripícolas	Nogueira (*Juglans,* ssp.)
	Pinheiro-de-alepo (*Pinus halepensis*)

Contribuição para as metas do PROF		Metas para 2030	Vigência do PGF	
		SRH Pinhais do Alentejo Litoral	Início	Final
% de espaços florestais		85	90,22	74,79
% de arborização		-	-	2,00
% composição florestal				
Pinheiro Manso	Aumentar		38	38
Sobreiro	Aumentar		11	11
Pinheiro bravo	Aumentar		50	50
Eucalipto	Aumentar		1	1

1 – CARACTERIZAÇÃO DOS OBJETIVOS DA EXPLORAÇÃO

1.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS RECURSOS

1.1.1 – CARACTERIZAÇÃO GERAL E COMPARTIMENTAÇÃO DA UG EM PARCELAS

Após a realização do inventário florestal e da observação cuidada do local pode-se verificar que, na UG são visíveis zonas que correspondem a diferentes usos, comprovado pelo mapa n.º 14 do anexo II:

Uso do solo	Área	
	ha	%
Agrícola	178,5	7,44
Açude da Murta	25,66	1,07
Caminho de acesso	3,55	0,15
Canal de rega	6,10	0,25
Florestal	1215,25	50,65
Incultos	4,70	0,20
Infraestruturas de apoio à gestão	1,50	0,06
Local arqueológico	0,01	0,00
Matos	949,23	39,57
N253	4,81	0,20
Ruinas	0,20	0,01
Zona de encharcamento	6,69	0,28
Área envolvente às edificações	2,90	0,12
Total	2399,14	100,00

Este território, com predominância de pinheiro manso e pinheiro bravo, possui também algumas áreas com eucaliptos dispersos e significativos núcleos de sobreiro. A zona envolvente da UG é constituída por áreas agrícolas, pinhal e montado de sobro. Topograficamente os terrenos confinantes assemelham-se à UG, garantindo um enquadramento e estética da paisagem (ver mapa n.º 15 do anexo II).

Com base nas condições ecológicas e nas potencialidades de produção, atendendo aos interesses e expectativas do titular e tendo em conta os princípios orientadores estabelecidos no PROF, as condicionantes e os riscos presentes, a área é organizada em cinco unidades operativas de gestão

(UOG) homogéneas, cuja localização se apresenta no mapa n.º 16 do anexo II. A UOG A corresponde à área agrícola, a UOG B à área florestal, a UOG C à área ripícola, a UOG D à área a converter em área agrícola e a UOG E á área de matos.

As UOG foram divididas em talhões e parcelas tendo em consideração, no caso da UOG A e C, o uso dominante do solo e o tipo de povoamento, respetivamente, no caso da UOG B, tendo em conta as espécies dominantes, o tipo de povoamento, o declive, o modelo de silvicultura e o tipo de intervenções a realizar, a UOG D foi identificada com base no uso futuro do solo, que se propõe agrícola, a UOG E com base na sua cobertura principal e na UOG F com base na função que estas áreas irão desempenhar. A UOG G com base na cobertura futura, que se propõe florestal.

As UOG foram divididas em talhões e parcelas tendo em consideração diferentes critérios. No caso da UOG A e C, considerou-se o uso predominante do solo e o tipo de povoamento, respetivamente. Para a UOG B, teve-se em conta as espécies dominantes, o tipo de povoamento, o declive, o modelo de silvicultura e o tipo de intervenções a serem realizadas. A UOG D foi identificada com base no uso futuro proposto como agrícola, a UOG E com base na sua principal cobertura e a UOG F com base na função futura que essas áreas irão desempenhar. A UOG G, com base na cobertura futura, que se propõe florestal.

A divisão das parcelas, poderá ser alterada consoante o que for deliberado na Declaração de Impacto ambiental.

A **UOG A** é constituída por dois talhões cada um com uma parcela de gestão:

- A.1.1 – Área agrícola de regadio - Arrozais
- A.2.1 – Área agrícola de sequeiro.

A **UOG B** é composta por três talhões, designadamente B.1, B.2 e B.3. O primeiro é constituído por duas parcelas de gestão, o segundo por três e o terceiro é composto apenas por uma parcela de gestão, como representado na sequência abaixo:



B.1.1 – Povoamento puro de pinheiro bravo, com pinheiro manso disperso e sobreiro muito disperso.



B.1.2 – Povoamento puro de pinheiro bravo.



B.2.1 – Povoamento puro de pinheiro manso (sem gestão nos últimos anos)



B.2.2 – Povoamento puro de pinheiro manso



B.2.3 – Povoamento puro de pinheiro manso jovem (Plantação)



B.3.1 – Povoamento misto de pinheiro bravo, pinheiro manso e sobreiro com acácias e eucaliptos dispersos.

A **UOG C** é constituída apenas por um talhão e com uma parcela:



C.1.1 – Galeria ripícola

A **UOG D** é constituída apenas por um talhão com uma parcela de gestão:



D.1.1 – Área a converter em cultura agrícola, atualmente constituída por matos, povoamentos puros de pinheiro bravo e pinheiro manso.

A **UOG E** é constituída apenas por dois talhões cada um com uma parcela de gestão:



- E.1.1 – Área de matos com pinheiro bravo e pinheiro manso disperso.



- E.2.1 – Área de matos com pinheiro manso disperso

A **UOG F** é constituída apenas por um talhão com uma parcela de gestão:

- F.1.1 – Área a converter em faixa de proteção à N253.

A **UOG G** é constituída apenas por um talhão com uma parcela de gestão:

- Área de Matos a converter em Povoamento misto de Pinheiro manso e Pinheiro bravo.

1.1.2 – COMPONENTE FLORESTAL

1.1.2.1 – CARACTERIZAÇÃO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS, *HABITATS* E POVOAMENTOS

UOG	Talhão	Parcela	Tipo de povoamento	Descrição das espécies	Área (ha)	Descrição dos povoamentos	Função dominante / Sub-funções
B	B.1	B.1.1	Florestal	*Pinus pinaster* *Pinus pinea* *Quercus suber*	545.98	Povoamento puro de *Pinus pinaster com pinus pinea disperso e pinus pinaster muito disperso*	**PD 1**/ PD 2 PD 4 CONS 1 CONS 2 CONS 4 SILV 1
B	B.1	B.1.2	Florestal	*Pinus pinaster*	8,90	Povoamento puro de *Pinus*	**PD 1**/ CONS 1

						pinaster	CONS 2
B	B.2	B.2.1	Florestal	*Pinus pinea*	254,30	Povoamento puro de *Pinus pinea*	**PD 4**/ PD1 CONS 1 CONS 2 CONS 4
B	B.2	B.2.2	Florestal	*Pinus pinea*	135,38	Povoamento puro de *Pinus pinea*	**PD 4**/ PD1 CONS 1 CONS 2 SILV 1
B	B.2	B.2.3	Florestal	*Pinus pinea*	5,59	Povoamento puro de *Pinus pinea*	**PD 4**/ PD1 CONS 1 CONS 2 SILV 1
B	B.3	B.3.1	Florestal	*Pinus pinea Pinus pinaster Quercus suber Acacia sp.*	86,21	Povoamento misto de *Pinus pinea* e *Pinus pinaster*	**PD 1**/ PD 2 CONS 1 SILV 1
C	C.1	C.1.1	Galeria Ripícola	*Salix salviifolia subsp. Salviifolia, Salix* sp., *Populus* sp. *Fraxinus angustifolia*	4,53	Povoamento misto de folhosas ripícolas	**PT 1**/ CONS 1 CONS 2 CONS 4
D	D.1	D.1.1	Florestal e Matos	*Pinus pinea Pinus pinaster*	302,90	Povoamento puro de *Pinus pinea Povoamento puro de pinus pinaster*	**PD 4 PD 1**/ CONS 1 CONS 2 SILV 1
E	E.1	E.1.1	Matos	*Pinus pinea Pinus pinaster*	573,55	Área de matos com árvores dispersas	CONS 1 CONS 2 CONS 4 SILV 1
E	E.2	E.2.1	Matos	*Pinus pinea Pinus pinaster*	116,80	Área de matos com árvores dispersas	CONS 1 CONS 2 SILV 1
F	F.1	F.1.1	Florestal e Matos	*Pinus pinea Pinus pinaster Quercus suber Acácia longifolia*	13,86	Povoamento puro de pinheiro manso Povoamento puro de pinheiro bravo Povoamento misto de sobreiro	**PT 3**/ PD 1 PD2 PD 4 CONS 1 CONS 2 CONS 4 SILV 1

						pinheiro manso pinheiro bravo e acácia	
G	G.1	F.2.1	Matos	*Pinus pinea*	110,54	-	**PD 4** / CONS 1 CONS 2 CONS 4 SILV 1

1.1.2.2 – CARACTERIZAÇÃO DO SUBCOBERTO

Parcela	Área (ha)	Estratos arbustivos e herbáceos	Grau de cobertura (%)	H dom (m)
B.1.1	545,98	Matos de porte elevado e densidade média	40	1,2
B.1.2	8,90	Matos de porte médio e densidade baixa	30	0,5
B.2.1	254,30	Matos de porte e densidade baixa	15	0,6
B.2.2	135,38	Matos de porte e densidade baixa	5	0,2
B.2.3	5,59	Matos de porte e densidade baixa	20	0,4
B.3.1	86,21	Matos de porte e densidade média	45	0,8
C.1.1	4,53	Matos de porte e densidade elevada	70	1,5
D.1.1	302,90	Matos de porte e densidade media	40	1
E.1.1	573,55	Matos de porte e densidade baixa	5	0,5
E.2.1	116,80	Matos de porte e densidade baixa	5	0,5
F.1.1	13,86	Matos de porte e densidade baixa	10	0,2
G.1.1	110,54	Matos de porte e densidade baixa	5	0,5

Nota: A composição do subcoberto encontra-se representada no ponto 2.1.1 – Integração das orientações de gestão do PSRN 2000 e outros, apresentado na página 59.

1.1.2.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS POVOAMENTOS

Parcela	Pedregosidade	Compactação	Erosão	Distrib. do arvoredo	Regime e estrutura	Modo de tratamento
B.1.1	Nula	Nula	Nula	Irregular	Alto fuste	Irregular
B.1.2	Nula	Nula	Nula	Irregular	Alto fuste	Regular

B.2.1	Nula	Nula	Nula	Regular	Alto fuste	Regular
B.2.2	Nula	Nula	Nula	Regular	Alto fuste	Regular
B.2.3	Nula	Nula	Nula	Regular	Alto fuste	Regular
B.3.1	Nula	Nula	Nula	Irregular	Alto fuste	Irregular
C.1.1	Nula	Nula	Nula	Irregular	Alto fuste	Irregular
D.1.1	Nula	Nula	Nula	Regular Irregular	Alto fuste	Irregular
E.1.1	Nula	Nula	Nula	Manchas	Alto fuste	Regular
E.2.1	Nula	Nula	Nula	Manchas	Alto fuste	Regular
F.1.1	Nula	Nula	Nula	Irregular	Alto fuste	Irregular
G.1.1	Nula	Nula	Nula	Regular	Alto fuste	Regular

Parcela	Espécie	Composição	Idade	Reg. Natural	Árvores menores	Árvores longevas e cavernosas	Árvores mortas
B.1.1	Pb, Pm, Sb	Puro	Várias	Não	Sim (Pb)	Não	Sim
B.1.2	Pb	Puro	[20 - 30]	Não	Não	Não	Não
B.2.1	Pm	Puro	[30 - 35]	Não	Sim (Pm, Md)	Não	Não
B.2.2	Pm	Puro	[30 - 35]	Não	Não	Não	Não
B.2.3	Pm	Puro	[10 - 15]	Não	Sim	Não	Não
B.3.1	Pm, Pb, Sb, Ac	Misto	Várias	Não	Sim (Pb, Pm, Sb)	Não	Sim (Sb, Pb, Ac)
C.1.1	Sa, Pp, Fr	Misto	Várias	Sim	Sim	Não	Não
D.1.1	Pb, Pm	Puro	Várias	Não	Sim	Não	Não
E.1.1	Pb, Pm	-	Várias	Não	Sim	Não	Não
E.2.1	Pm, Pb	-	Várias	Não	Não	Não	Não
F.1.1	Pm, Ac, Sb, Pb	-	Várias	Não	Sim	Não	Sim
G.1.1	Pb	-	Várias	Não	Não	Não	Não

Legenda: Az – *Quercus ilex;* Sb – *Quercus suber*; Pm –*Pinus pinea*, Pb – *Pinus pinaster*, Ec – *Eucalyptus globulus*, Sa – *Salix* sp; Pp – *Populus*, sp., Fr – *Fraxinus angustifólia.,* Md- *Arbutus unedo*

Parcela	% cob	Densidade (árv/ha)	H méd (m)	H dom (m)	DAP méd (cm)	Biomassa aérea (kg/ha)	Biomassa do solo (kg/ha)
B.1.1	25	110	9,3	12,2	17,2	11352	2524
B.1.2	65	220	16,1	17,8	32	76283	21024
B.2.1	80	630	5,0	7,1	12,6	16427	2467
B.2.2	55	127	5,9	7,2	22,6	21639	1941
B.2.3	15	122	3,1	4,2	9,2	6270	1720
B.3.1	35	268	9,5	13,2	18,1	56975	3402
C.1.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
D.1.1	20	136	8,7	11,8	22,2	33271	2397
E.1.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
E.2.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
F.1.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
G.1.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Legenda: cob – Cobertura; H méd – Altura média; H dom – Altura dominante; DAP méd – Diâmetro médio à altura do peito; N.D. – Não disponível.

1.1.2.4 – ESTIMATIVAS DE PRODUÇÃO

Produto florestal		Estimativa	
		Ano	Quantidade
Cortiça		2024	1300 @
Pinha		2026/7	8 ton
Madeira	**Pinheiro-bravo** (corte raso da parcela D.1.1)	2026/27	354 m^3
	Pinheiro-manso (corte raso da parcela D.1.1)		5776 m^3

Uma vez que a parcela D.1.1 irá sofrer um corte raso de pinheiro-manso, estima-se que a perda de produção de pinha desta parcela será de cerca de 3,2 ton (já descontados do valor acima estimado para o ano de 2026/27).

1.1.3 – COMPONENTE SILVOPASTORIL

1.1.3.1 – CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAGENS E DOS RECURSOS FORRAGEIROS

Não aplicável na UG.

1.1.4 – COMPONENTE CINEGÉTICA, AQUÍCOLA E APÍCOLA

	Designação	Localização/Talhão	Observações
Campos de alimentação da fauna:	Áreas com maior densidade de matos e galerias ripícolas	Toda a UG	Em algumas áreas com maior densidade de matos na UG e galeria ripícola
Zonas de refúgio da fauna:	Áreas com maior densidade de matos	C.1.1	Em algumas áreas com maior densidade de matos na UG
Galerias ribeirinhas:	Não aplicável	---	Áreas ripícolas na UG sem fauna piscícola
Flora melífera:	*Cistus* sp., *Lavanda* sp., *Ulex* sp., *Rubus* sp.	Em toda a UG	Espécie presente em todo o subcoberto
Recursos micológicos:	Não aplicável	---	Aquando da realização do inventário não se verificou a presença de fungos

1.1.5 – COMPONENTE DE RECURSOS GEOLÓGICOS E ENERGÉTICOS

1.1.5.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS RECURSOS ENERGÉTICOS

Não se pretende efetuar aproveitamento da biomassa para fins energéticos na UG.

1.1.5.2 – CARACTERIZAÇÃO DOS RECURSOS GEOLÓGICOS

Na UG não existem recursos geológicos, tais como pedreiras, minas ou saibreiras.

1.2 – ORGANIZAÇÃO DA GESTÃO E ZONAMENTO FUNCIONAL

Parcela	Área (ha)	Função dominante/ Sub-funções	Tipo de povoamento	Modelo de silvicultura
B.1.1	545,98	**PD 1**/ PD 2 PD 4 CONS 1 CONS 2 CONS 4 SILV 1	Florestal	PB- Povoamento puro de Pinheiro bravo, para produção de lenho.
B.1.2	8,90	**PD 1**/ CONS 1 CONS 2	Florestal	PB- Povoamento puro de Pinheiro bravo, para produção de lenho.
B.2.1	254,30	**PD 4**/ PD1 CONS 1 CONS 2 CONS 4	Florestal	PM1 - Povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de lenho e fruto.
B.2.2	135,38	**PD 4**/ PD1 CONS 1 CONS 2 SILV 1	Florestal	PM1 - Povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de lenho e fruto.
B.2.3	5,59	**PD 4**/ PD1 CONS 1 CONS 2 SILV 1		PM1 - Povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de lenho e fruto.
B.3.1	86,21	**PD 1**/ PD 2 CONS 1 SILV 1	Florestal	PM1 - Povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de lenho e fruto. PB- Povoamento puro de Pinheiro bravo, para produção de lenho. SB1 - Povoamento puro de Sobreiro em sobreiral, para produção de cortiça.
C.1.1	4,53	**PT 1**/ CONS 1 CONS 2 CONS 4	Galeria Ripícola	RI - Povoamento misto de Ripícolas, para proteção.
D.1.1	302,90	**PD 4 PD 1**/ CONS 1 CONS 2 SILV 1	Florestal	Não aplicável.
E.1.1	573,55	CONS 1 CONS 2 CONS 4	Matos	Não aplicável.

		SILV 1		
E.2.1	116,80	CONS 1 CONS 2 SILV 1	Matos	Não aplicável.
F.1.1	13,86	**PT 3**/ PD 1 PD2 PD 4 CONS 1 CONS 2 CONS 4 SILV 1	Florestal e Matos	Não aplicável.
G.1.1	110,54	**PD 4** / CONS 1 CONS 2 CONS 4 SILV 1	Matos	PM2 - Povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de fruto.

Nota: Os modelos de silvicultura encontram-se no anexo VIII.

2 – PROGRAMAS OPERACIONAIS

Enquadramento na Zona Especial de Conservação Comporta-Galé (PTCON0034), na Zona de Proteção Especial do Estuário do Sado (PTZPE0011) e na Zona de Proteção Especial do Açude da Murta (PTZPE0012)

A propriedade objeto deste PGF integra a Rede Natura 2000, estando a sua área totalmente incluída na ZEC Comporta-Galé (PTCON0034) e parcialmente nas ZPE do Estuário do Sado (311 ha) e do Açude da Murta (494 ha). A unidade paisagística de referência são as planícies costeiras, formadas por areias plistocénicas, com coberto vegetal dominado por pinhal, existindo grande representatividade de habitats do tipo psamófilos em variedade, extensão e estado de conservação.

O plano de gestão da biodiversidade que aqui se apresenta pretende dar cumprimento a objetivos e metas tangíveis, garantindo a sua transversalidade no contexto territorial em análise e promovendo o caráter operacional das ações propostas. Os valores naturais que constituem o património ambiental da Herdade da Murta e Monte Novo justificam o planeamento e a definição de orientações de gestão específicas em função da sua distribuição espacial.

A Diretiva Habitats, transposta para a legislação nacional através da Diretiva 92/43/CEE, de 21 de maio e a Diretiva Aves, transporta para a legislação nacional através da Diretiva 2009/147/CE, são responsáveis, respetivamente, pelo devido enquadramento legal e operacional da RN2000, ao nível das Zonas Especiais de Conservação e das Zonas de Proteção Especial. Estes documentos estabelecem normas comuns para a conservação da vida animal, espécies de plantas e habitats de importância comunitária.

Para caraterização da distribuição espacial dos habitats prioritários da Herdade da Murta e Monte Novo foram realizados transetos lineares com a duração de 30 minutos em 6 quadrículas não contíguas, de 500 m x 500 m. Procedeu-se ao elenco florístico e faunístico da propriedade, com especial atenção às espécies indicadores de habitat e às presentes no anexo II da Diretiva 92/43/CE e do anexo I da Diretiva 2009/147/CE

Na tabela seguinte, apresenta-se a lista de espécies detetadas ao longo dos transetos realizados durante o mês de maio de 2022 na Herdade da Murta e Monte Novo, bem como o seu estatuto de conservação e, nos casos aplicáveis, o devido enquadramento na Diretiva Habitats.

Elenco florístico e faunístico da Herdade da Murta e Monte Novo (espécies de ocorrência comprovada)

Espécie	Estatuto de conservação (IUCN)
Allium pruinatum	-
Ruscus aculeatus	LC
Cheirolophus uliginosus	NT
Cirsium welwitschii	EN
Lepidophorum repandum	-
Anchusa calcarea subsp. calcarea	-
Iberis ciliata subsp. welwitschii	-
Iberis procumbens subsp. procumbens	-
Jonopsidium acaule	LC
Dianthus broteri	-
Rhynchospora modesti-lucennoi	VU
Pterocephalidium diandrum	-
Euphorbia boetica	-
Euphorbia uliginosa	NT
Cytisus grandiflorus subsp. cabezudoi	-
Stauracanthus genistoides	-
Ulex australis subsp. welwitschianus	LC
Quercus suber	-
Juncus emmanuelis	VU
Juncus rugosus	-
Thymus capitellatus	LC
Utricularia gibba	VU
Dactylorhiza elata	NT
Odontitella virgata	-
Armeria rouyana	NT
Agrostis juressi	VU
Salix salviifolia subsp. salviifolia	-
Santolina impressa	LC
Juniperus navicularis	NT
Corema album	VU
Calluna vulgaris	NE
Corynephorus canescens	-

Espécie	Estatuto de conservação (IUCN)
Quercus lusitanica	-
Stauracanthus genistoides	-
Suaeda vera	NE
Apus apus	LC
Ardea cinerea	LC
Ardea purpurea	EN
Alectoris rufa	LC
Bubo bubo	NT
Galerida cristata	LC
Luscinia megarrynchos	LC
Saxicola rubicola	LC
Fringilla coelebs	LC
Emberiza callandra	LC
Corvus corone	LC
Phylloscopus Bonelli	LC
Sitta europaea	LC
Emberiza cirlus	LC
Corvus corone	LC
Phylloscopus Bonelli	LC
Sitta europaea	LC
Emberiza cirlus	LC
Troglodytes troglodytes	LC
Streptopelia turtur	LC
Columba palumbus	LC
Streptopelia decaocto	LC
Upupa epops	LC
Chloris chloris	LC
Serinus serinus	LC
Sylvia atricapilla	LC
Cyanopica cooki	LC
Lullula arborea	LC
Galerida theklae	LC
Dendrocops major	LC
Parus major	LC
Phylloscopus ibericus	LC
Cettia cetti	LC
Aegithalos caudatus	LC
Lepus granatensis	LC
Oryctolagus cuniculus	NT
Vulpes vulpes	LC
Herpestes ichneumon	LC
Sus scrofa	LC

Legenda: LC - pouco preocupante; NT- quase ameaçado; NE - não avaliado; VU - vulnerável

No mapa 9.2 do anexo II pode observar-se a distribuição espacial dos valores de conservação prioritários identificados na Herdade Murta e Monte Novo: foram identificados 6 habitats listados no Anexo B-I do Decreto-Lei n.º 140/99, de 24 de abril, alterado pelo Decreto-Lei nº 49/2005, de 24 de fevereiro:

- 2150*- Dunas fixas descalcificadas atlânticas (*Calluno-Ulicetea*)
- 2250* - Dunas litorais com *Juniperus spp*
- 2260 - Dunas com vegetação esclerófila da *Cisto-Lavenduletalia*
- 2330 – Dunas interiores com prados abertos de *Corynephorus* e *Agrostis*
- 6310 - Montados de *Quercus spp*. de folha perene.
- 6410 - Pradarias com *Molinia* em solos calcários, turfosos e argilo-limosos (*Molinion caeruleae*).

2.1 – PROGRAMAÇÃO DE GESTÃO DA BIODIVERSIDADE (ÁREAS CLASSIFICADAS)

Face aos valores naturais de conservação identificados na Herdade da Murta e Monte Novo, é proposto um conjunto de orientações de gestão de especificidade local com os seguintes propósitos: i) promover a manutenção das funções ecológicas, ao nível da diversidade de espécies, ecossistemas e habitats; ii) implementar estratégias de remediação e compensação; iii) identificar oportunidades e cadeias de valor associadas aos serviços prestados pela biodiversidade; iv) garantir o enquadramento regulatório, para além do cumprimento básico da legislação; v) determinar, no tempo e no espaço, medidas silvícolas que contribuam para assegurar a perenidade de habitats prioritários e espécies protegidas. As orientações gerais de gestão estão elencadas na tabela seguinte. A distribuição espacial dos habitats prioritários nas parcelas de gestão pode ser consultada no mapa nº 17.2

Valor de conservação prioritário	Descrição	Área total ocupada (ha)	Orientações de gestão
Habitat 2260- Dunas com vegetação esclerofila da *Cisto-Lavanduletalia*	Comunidades arbustivas espinhosas, xerofíticas, dominadas pelo género *Stauracanthus sp* e outros arbustos espinhosos e malacófilos (*Halimium sp*, *Cistus sp*, *Helichrysum sp* e *Lavandula sp*), próprios de areias soltas. São ricos em endemismos e ocorrem em dunas terciárias holocénicas, paleodunas plio-pleistocénicas (litorais e interiores).	1450,80	• Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado • Qualquer mobilização superficial do solo está condicionada a parecer do ICNF e só poderá acontecer em casos excecionais e devidamente justificados • Condicionar o trânsito de pessoas e veículos na área de ocupação do habitat • O controlo da flora alóctone só deve acontecer com recurso a maquinaria

			moto manual • Condicionar alterações ao uso do solo, regulando atividades prejudiciais à vegetação • Condicionar alterações ao uso do solo em áreas de dunas não arborizadas
Habitat 2250 – Dunas litorais com *Juniperus spp**2250pt2- Paleodunas com matagais de *Juniperus navicularis*	Matagais dominados por *Juniperus navicularis*, que ocorrem como vegetação permanente e madura em topos secos de paleodunas profundas, sem águia freática e secundariamente em alguns areais indiferenciados com pouca capacidade de retenção de água. 	70,11	• As áreas de habitat deverão ser marginalizadas por uma faixa de proteção de largura nunca inferior a 50 m e delimitadas por postes de madeira com 1,80 m de altura, equidistantes a 6 m • Apenas são admitidas ações de remoção de material morto e infestante, quando necessário e sem recurso a maquinaria • Condicionar o trânsito de veículos motorizados
Habitat 2150 – Dunas fixas descalcificadas atlânticas*2150pt1 – Dunas fixas com torzais-urzais e tojais-estevais psamófilos com *Ulex australis* subsp. *welwitschianus*	Dunas fixas com tojais-urzais e tojais-estevais psamófilos dominados ou co-dominados por *Ulex australis* subsp. *welwitschianus*, acompanhado por *Halimium halimifolium*, *Calluna vulgaris*, *Cistus ladanifer*, *Erica scoparia* e *Erica umbellat*a. 	138,52	• Sempre que as áreas de habitat sejam coincidentes com linhas de água, deverá ser delimitada uma faixa de 50 m (25 m para cada lado), nas quais as únicas ações admitidas são a remoção de material morto e infestante, quando necessário e sem recurso a maquinaria • Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado • As ações previstas nas áreas envolventes às faixas de proteção devem ser sinalizadas, de forma a indicar inequivocamente que a delimitação de proteção não está a ser transposta • Promover as mobilizações ligeiras de substrato, em detrimento das profundas • Controlar as plantas exóticas infestantes • Reforçar a fiscalização sobre deposição ilegal de lixos, entulho e outros resíduos

Habitat 6410 – Pradarias com *Molinia* em solos calcários, turfosos e argilo-limosos (*Molinion caeruleae*)*6410pt2-Juncais acidófilos de *Juncus acutiflorus*, *Juncus conglomeratus* e/ou *Juncus effusus*	Prados-juncais e juncais dominados por *Juncus acutiflorus*, *Juncus conglomeratus* e/ou *Juncus effusus*, que ocupam solos profundos sempre húmidos, encharcados durante a maior parte do ano.	1,22	• Condicionar ações de drenagem • Condicionar o pastoreio, privilegiando o regime extensivo • Controlar o despejo de efluentes não tratados • As áreas de habitat deverão ser marginalizadas por uma faixa de proteção de largura nunca inferior a 50 m e delimitadas por postes de madeira com 1,80 m de altura, equidistantes a 6 m • Apenas são admitidas ações de remoção de material morto e infestante, quando necessário e sem recurso a maquinaria
Habitat 2330 – Dunas interiores com prados abertos de *Corynephorus* e *Agrostis*	Arrelvados vivazes pioneiros, mais ou menos abertos, com dominância de *Corynephorus canescens* var. *maritimus*. Ocorrem em solos arenosos, pouco desenvolvidos, de caráter xérico e pobres em nutrientes, de dunas cinzentas, terciárias ou paleodunas. 	19,77	• Condicionar a exploração de inertes • Controlar a flora alóctone, somente com maquinaria moto manual • Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado • Condicionar a implantação de infraestruturas
Habitat 6310 – Montados de Quercus spp. de folha perene		68,53	• Promover e ordenar a regeneração natural • Ordenar o pastoreio • Combater pragas e doenças • Encaminhar estrato arbóreo • Adensamento com sobro ou azinho, se considerado necessário.
Armeria rouyana	Planta endémica de Portugal continental, com distribuição restrita ao litoral norte alentejano, península de Setúbal e bacia inferior do Tejo, com um isolado populacional na Beira Baixa. Ocorre em matos baixos e esparsos ou clareiras em pinhais abertos sublitorais, em substratos arenosos acídicos e secos, geralmente em paleodunas.		• Áreas identificadas com a presença de populações de *A. rouyana* deverão ser marginalizadas por uma faixa de proteção de largura nunca inferior a 50 m e delimitadas por postes de madeira com 1,80 m de altura, equidistantes a 6 m • Apenas são admitidas ações de remoção de material morto e infestante, quando necessário e sem recurso a maquinaria • Os ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho

	• Promover a criação de rede de clareiras, de modo a manter a continuidade entre as várias populações • As populações de *A rouyana* que ocorrem na área de implantação de pomares e construções deverão ser identificadas com fita sinalizadora. O corte ou colheita dos indivíduos desta espécie só deve acontecer após a recolha dos seus propágulos/ sementes. Estes devem ser distribuídos em épocas e locais favoráveis, em favorecimento das áreas de ocorrência dos habitats 2330 e 2260 degradados.

No âmbito da salvaguarda dos valores naturais presentes, todas as áreas situadas na envolvente dos setores agrícolas e das infraestruturas de apoio onde tenham sido cartografados habitats prioritários (2150* e 2250*) e/ou núcleos de endemismos lusitanos deverão ser devidamente demarcadas com estacas, fita sinalizadora e placard identificador, de forma a garantir a sua preservação, evitando o pisoteio ou qualquer outro tipo de intervenção.

Deverão ser planificados todos os trabalhos e sensibilizados todos os intervenientes e trabalhadores envolvidos, nomeadamente através de ações de formação e sensibilização ambiental, para os cuidados a observar durante as diferentes fases do projeto, com o objetivo de minimizar os impactes negativos sobre as comunidades vegetais, as populações de espécies com interesse para a conservação e os respetivos habitats presentes na área e que não poderão ser intervencionados. Em particular, deverá ser ministrada formação específica aos operadores de maquinaria, assegurando a salvaguarda dos valores naturais existentes na envolvente das áreas agrícolas. Durante a fase de exploração, o promotor deverá dar continuidade às ações de sensibilização ambiental junto dos trabalhadores, promovendo a adoção de boas práticas ambientais compatíveis com os valores ecológicos presentes, designadamente evitando o pisoteio da vegetação nas áreas envolventes aos caminhos.

Com vista à promoção da biodiversidade e ao reforço das condições de habitat para a fauna, prevê-se a criação de locais de alimentação para diferentes grupos faunísticos, através da implementação de faixas de sementeira de cereais/gramíneas constituídas por leguminosas anuais de ressementeira natural e/ou leguminosas e gramíneas perenes. Complementarmente, deverá ser promovido o estabelecimento de espécies de fauna mediante a instalação de estruturas de abrigo e refúgio, nomeadamente caixas-ninho para aves insetívoras e morcegos na zona a oeste do Açude da Murta, bem como amontoados de pedras destinados ao refúgio de mamofauna, herpetofauna e avifauna.

Deverão igualmente ser acauteladas eventuais alterações da qualidade da água associadas a escorrências contaminadas com pesticidas e fertilizantes, mediante a adoção de boas práticas agrícolas e a monitorização da qualidade da água, de forma a evitar a afetação de espécies mais sensíveis de fauna piscícola e anfíbios nas linhas de água situadas a jusante, em particular no Açude

da Murta. Neste contexto, deverá ser promovida a recuperação e valorização ecológica da zona do Açude da Murta e áreas envolventes. Após aprovação, pela APA, do reperfilamento da linha de água, deverá ser apresentado ao ICNF o projeto de restauro ecológico do Açude da Murta, contemplando prioritariamente o controlo de espécies exóticas invasoras, bem como a recuperação da galeria ripícola, com o objetivo de estabelecer um corredor ecológico fluvial.

Adicionalmente, deverá ser promovida a rearborização de talhões localizados a este e oeste do Açude da Murta, com vista à compensação das árvores abatidas, contribuindo para a reposição do sumidouro de carbono e para o reforço do processo de restauro ecológico desta área.

2.1.1 – INTEGRAÇÃO DAS ORIENTAÇÕES DE GESTÃO DO PSRN 2000 E OUTROS

Parcelas	Valores de Conservação	Povoamentos /Formações vegetais	Orientações de gestão	Observações (intervenções/medidas silvícolas)
B.1.1	Habitat **2150** Habitat **2250*** Habitat **2260** Habitat **233**0 Habitat **6310** Habitat **6410** Habitat **2250** ***Armeria rouyana***	**Estrato arbóreo** Pb * Pb * Sb (Povoamento puro de *Pinus pinaster*, com *Pinus pinea* e *Quercus suber* muito disperso) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Armeria rouyana* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosus* *Cirsium welwitschii* *Cistus salviifoliu* *Corynephorus canescens* var. *maritimus* *Daphne gnidum* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum* *Iberis ciliata subsp. welwitschii* *Juniperus navicularis* *Lavandula stoechas* *Lepidophorum repandum* *Phillyrea angustifolia* *Ruscus aculeatus*	Adaptar práticas silvícolas específicas Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo Reduzir o risco e incêndio	- Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes; - Nas áreas de ocorrência de *Armeria rouyana*, os ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho.

		Santolina impressa *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor* *Iberis procumbens subsp. procumbens*		
B.1.2	Habitat **2260** Habitat **2150***	**Estrato arbóreo** **Pb** (Povoamento puro *Pinus pinaster*) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Armeria rouyana* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosu* *Cirsium welwitschii* *Cistus salviifoliu* *Corynephorus canescens var. maritimus* *Daphne gnidum* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum* *Iberis ciliata subsp. welwitschii* *Iberis procumbens subsp. procumbens* *Juniperus navicularis* *Lavandula stoechas*	Adaptar práticas silvícolas específicas Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo Reduzir o risco e incêndio	- Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes; - Promover práticas ligeiras de mobilização do substrato

		Lepidophorum repandum *Phillyrea angustifolia* *Ruscus aculeatus* *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor*		
B.2.1	Habitat **2260** Habitat **2250** Habitat **6410**	**Estrato arbóreo** Pm (Povoamento puro de *Pinus pinea*) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosu* *Cirsium welwitschia* *Cistus salviifoliu* *Daphne gnidum* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum* *Iberis ciliata subsp. welwitschii* *Iberis procumbens subsp. Procumbens* *Juniperus navicularis* *Juniperus navicularis* *Lavandula stoechas* *Lepidophorum repandum* *Phillyrea angustifolia*	- Adaptar práticas silvícolas específicas - Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo - Reduzir o risco e incêndio	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes;

		Ruscus aculeatus *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor*		
B.2.2	Habitat **2250** Habitat **2260** Habitat **2330** Habitat **2150** ***Armeria rouyana***	**Estrato arbóreo** **Pm** (Povoamento puro de *Pinus pinea*) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Armeria rouyana* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosu* *Cirsium welwitschii* *Cistus salviifoliu* *Corynephorus canescens var. maritimus* *Daphne gnidum* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum* *Iberis ciliata subsp. welwitschii* *Iberis procumbens subsp. procumbens* *Juniperus navicularis* *Juniperus navicularis*	Adaptar práticas silvícolas específicas Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo Reduzir o risco e incêndio	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes; - Nas áreas de ocorrência de *Armeria rouyana*, os ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho

		Lavandula stoechas *Lepidophorum repandum* *Phillyrea angustifolia* *Ruscus aculeatus* *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor*		
B.3.1	Habitat **2260** Habitat **2150** Habitat **6310** Habitat **6410** Habitat **2330** Habitat **2250**	**Estrato arbóreo** Pb * Pm * Sb * Ec (Povoamento misto de Pinus pinaster, Pinus pinea e Quercus suber, com *Eucalyptus globulus* dispersos) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosu* *Cirsium welwitschii* *Cistus salviifoliu* *Corynephorus canescens var. maritimus* *Daphne gnidium* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum* *Iberis ciliata subsp. welwitschii*	Adaptar práticas silvícolas específicas Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo Reduzir o risco e incêndio	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes;

		Iberis procumbens subsp. procumbens *Juniperus navicularis* *Lavandula stoechas* *Lepidophorum repandum* *Phillyrea angustifolia* *Ruscus aculeatus* *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor*		
E.1.1	Habitat **2150** Habitat **2250** Habitat **2260** Habitat **2330** Habitat **6410** ***Armeria rouyana***	**Estrato arbóreo** Pb * Pm (Matos com *Pinus pinaster* e *Pinus pinea* dispersos) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Armeria rouyana* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosu* *Cirsium welwitschii* *Cistus salviifoliu* *Corynephorus canescens var. maritimus* *Daphne gnidum* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum*	Adaptar práticas silvícolas específicas Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo Reduzir o risco e incêndio	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas

		Iberis ciliata subsp *Juniperus navicularis* *Lavandula stoechas* *Lepidophorum repandum* *Phillyrea angustifolia* *Ruscus aculeatus* *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor*		ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes; - Nas áreas de ocorrência de *Armeria rouyana*, os ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho
E.2.1	Habitat **2150** Habitat **2250** Habitat **2260** Habitat **2330** Habitat **6410**	**Estrato arbóreo** Pm (Matos com *Pinus pinea* disperso) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosu* *Cirsium welwitschii* *Cistus salviifoliu* *Corynephorus canescens var. maritimus* *Daphne gnidum* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum* *Iberis ciliata subsp* *Juniperus navicularis* *Lavandula stoechas* *Lepidophorum repandum*	Adaptar práticas silvícolas específicas Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo Reduzir o risco e incêndio	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a

		Phillyrea angustifolia *Ruscus aculeatus* *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor*		renovação do banco de sementes;
G.1.1	Habitat **2150** Habitat **2250** Habitat **2260** Habitat **2330**	**Estrato arbóreo** Pb (Matos com *Pinus pinaster* disperso) **Estrato arbustivo** *Allium pruinatum* *Anchusa calcarea subsp. calcarea* *Asparagus acutifolius* *Cheirolophus uliginosu* *Cirsium welwitschii* *Cistus salviifoliu* *Corynephorus canescens var. maritimus* *Daphne gnidum* *Dittrichia viscosa* *Halimium halimifolium* *Helichrysum italicum* *Iberis ciliata subsp* *Juniperus navicularis* *Lavandula stoechas* *Lepidophorum repandum* *Phillyrea angustifolia* *Ruscus aculeatus* *Stauracanthus genistoide* *Thymus capitellatus*	Adaptar práticas silvícolas específicas Conservar/recuperar vegetação dos estratos herbáceo e arbustivo Reduzir o risco e incêndio	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual; - Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes a preservar antes de realizar qualquer intervenção; - Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes;

	Ulex australis subsp. welwitschianus *Ulex australis subsp. welwitschianus* *Ulex minor*	

2.2 – PROGRAMA DE GESTÃO LENHOSA

Parcelas	Modelo de silvicultura	Descrição do modo de condução
B.1.1	PB1	Manter à perpetuidade um povoamento puro irregular, com a principal função a produção de madeira. As árvores de sobreiro muito dispersas serão conduzidas da mesma forma que as presentes na parcela B.3.1. Presença de árvores com várias classes de idade. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
B.1.2	PB1	Manter à perpetuidade um povoamento puro irregular, com a principal função a produção de madeira. Presença de árvores com várias classes de idade. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
B.2.1	PM1	Manter à perpetuidade um povoamento puro regular, com a principal função a produção de fruto. Presença de árvores com várias classes de idade. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, enxertia, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
B.2.2	PM1	Manter à perpetuidade um povoamento puro regular, com a principal função a produção de fruto. Presença de árvores com várias classes de idade. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, enxertia, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
B.2.3	PM1 PB	Manter à perpetuidade um povoamento puro regular, com a principal função a produção de fruto. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, enxertia, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
B.3.1	PM1 PB SB	Manter à perpetuidade um povoamento misto irregular, com as principais funções de produção de fruto, madeira e cortiça. Nesta parcela parece existir um distúrbio, de origem desconhecida, devido á existência de árvores mortas de todas as espécies, nomeadamente sobreiros, pinheiros bravos e acácias, pelo que se recomenda o estudo da sua origem. Recomenda-se ainda o controlo de espécies invasoras,

		nomeadamente a *Acácia longifólia.* Presença de árvores com várias classes de idade. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, enxertia, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
C.1.1	RI	Manter um povoamento misto de espécies Ripícolas, para proteção. Realizar o mínimo de intervenções possíveis, e sempre quando apenas necessário. As Normas de gestão ativa e restrições na restauração de galerias ripícolas encontram-se no Anexo V. Sempre que se pretenda intervir nestas áreas deverá ser realizado um pedido de autorização à entidade competente.
D.1.1	N/A	Pretende-se converter esta área constituída por floresta de pinheiro bravo, pinheiro manso e matos em área agrícola. Serão arrancadas todas as árvores de pinheiro manso e pinheiro bravo e respetivos cepos removidos.
E.1.1	N/A	Pretende-se manter o uso atual do solo nesta área, durante os primeiros 5 anos do PGF agora apresentado, após o qual, com base no estudo a realizar na área de investigação, se pretende arborizar esta área maximizando o sucesso das plantações. Presença de árvores com várias classes de idade. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, enxertia, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
E.2.1	N/A	Pretende-se manter o uso atual do solo nesta área, durante os primeiros 5 anos do PGF agora apresentado, após o qual, com base no estudo a realizar na área de investigação, se pretende arborizar esta área maximizando o sucesso das plantações. Presença de árvores com várias classes de idade. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, enxertia, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.
F.1.1	N/A	Pretende-se instalar uma cortina de abrigo, de cerca de 10m de largura, com o objetivo de diminuir o impacto visual das culturas intensivas ao longo da N253. Serão instaladas as seguintes espécies; *Tamarix sp.*, *Nerium sp.*, *Quercus coccifera, Ulex europaeus, Pistacia lentiscus, Crataegus monogyna e Pyrus bourgeana.* Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, podas de formação, desramação, enxertia, desbaste, descortiçamento, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.

G.1.1	PM2	Planeia-se a conversão desta área de matos num povoamento puro de pinheiro manso para produção de fruto, ao longo de um período de 15 anos. Será adotado um compasso de 5 x 5 m, resultando num total de 400 árvores por hectare. A plantação será realizada exclusivamente com plantas certificadas, garantindo a qualidade e a sustentabilidade do projeto. Sempre que necessário efetuar o controlo da vegetação espontânea, desramações, desbastes, cortes sanitários e ações de controlo de pragas e doenças.

Plano de Cortes

Povoamentos abrangidos	Parcelas	Área (ha)	Ano	Observações
Pinheiro-manso Pinheiro bravo	D.1.1	302,90	2026/27	Abate de todas as árvores de pinheiro manso e pinheiro bravo ao longo da parcela.
Sobreiro	B.1.1 B.3.1	632,19	Sempre que necessário	Abate sanitário de árvores mortas e decrépitas
Pinheiro-manso	B.2.1	254,30	2026/27	Operação de desbaste Remoção de 75% das árvores
Pinheiro-manso	B.2.2	135,38	2026/27	Operação de desbaste Remoção de 25% das árvores
Pinheiro bravo Pinheiro manso	B.1.1 B.1.2 B.2.1 B.2.2 B.2.3 E.1.1 E.2.1 F.1.1	2048,00	Sempre que necessário	Abate sanitário de árvores mortas e decrépitas

Plano de Intervenções - Descrição Técnica das Ações Propostas

Operação de beneficiação do povoamento

Operação	Descrição Técnica
Sinalização da regeneração natural	Marcação dos exemplares que estejam escondidos e abafados pelo mato existente e que se pretendam preservar. Marcação com fita sinalizadora da regeneração natural existente.
Seleção de árvores de futuro	Seleção das melhores árvores, as mais bem conformadas, com melhores características de produção e convenientemente distribuídas no povoamento.
Correção de densidade excessiva	Regulação da densidade, promovendo melhores condições de desenvolvimento às árvores de futuro e garantindo uma maior vitalidade do povoamento.
Controlo de vegetação espontânea	Com esta operação pretende-se destruir o mato existente, de modo a eliminar a concorrência relativamente à água e elementos nutritivos. Pretende-se efetuar a gestão seletiva dos matos de forma a preservar as espécies com elevado interesse para a conservação, a não condicionar o seu desenvolvimento e a promover o aparecimento de zonas de maior densidade. O controlo de matos será realizado com corta matos acoplado a um trator de potência não inferior a 90 hp. A operação manual, complementando a limpeza mecânica, será realizada em locais onde a mecanização não seja possível, nomeadamente junto às copas das árvores, galerias ripícolas e em locais com maior declive será feita utilizando enxadas, motorroçadoras de disco, etc.
Restauração da fertilidade do solo	Propõe-se, sempre que necessário, a realização de adubação de cobertura e/ou correção do pH do solo, sendo o tipo de adubo e as doses a aplicar definidos com base em análises de solo previamente efetuadas. As linhas de água deverão ser salvaguardadas, de forma a evitar eventuais escorrências.
Desramação	A efetuar, sempre que necessário, a partir do solo, nos indivíduos vigorosos com dominância apical, para corrigir a forma das árvores mal-conformadas. Suprimem-se os ramos de baixo para cima. A altura a desramar nunca deverá ser superior a 1/3 da altura total.
Poda de formação	Pretende-se realizar podas de formação nas árvores jovens de modo a melhorar o crescimento das árvores, aumentando qualidade vegetativa do povoamento e, consequentemente, a sua produção. Através das podas de formação pretende-se obter fustes direitos e elevados, com 2 a 3 metros de altura, o que permitirá futuramente o máximo aproveitamento

	de superfícies a descortiçar. Nesta operação não deverá ser removido mais de 1/3 dos ramos vivos de cada vez. Deverá ser realizada considerando a totalidade da copa, com o início do processo de seleção dos ramos no topo da mesma, seguindo gradualmente para a base, de forma a identificar e a remover os ramos secundários que tentem competir com o ramo principal, ramos muito verticais ou com tendência para engrossar, e ramos muito próximos do solo. Esta operação obriga a desinfeção de todo o material utilizado, de modo a prevenir a propagação de pragas e doenças entre árvores.
Poda sanitária	Pretende-se eliminar ramos secos ou doentes que possam ser transmissores de pragas ou doenças dentro do povoamento. Esta operação será realizada com o recurso a motosserras e serras, sendo feita a desinfeção do material usado sempre que se mude de árvore. No caso do sobreiro, a poda não poderá ser realizada 2 anos antes nem 2 anos depois de a árvore ter sido descortiçada.
Abate sanitário	Realizar em árvores secas, doentes, decrépitas ou dominadas, sendo obrigatória, para o caso do Sobreiro, a prévia marcação com traço a tinta indelével, ao longo de todo o perímetro do tronco.
Remoção de cepos	A efetuar após o corte da árvore. As toiças serão destruídas com um destroçador mecânico.
Desbaste	Esta operação permite aumentar o espaçamento entre as árvores, estimulando o seu crescimento em diâmetro e proporcionar condições de boa frutificação à copa.
Controle de espécies invasoras	Realização de controlo mecânico, que promova a estabilização do seu núcleo, nomeadamente através do arranque das plantas jovens com a raiz inteira. Descasque da árvore adulta, deixando secar totalmente**,** e só depois proceder ao corte da árvore. A secagem pode demorar vários meses a alguns anos.
Instalação de armadilhas para Plátipo	Pretende-se colocar armadilhas para captura do inseto *Platypus cylindrus*, estando prevista a captura entre abril e novembro. As armadilhas serão apoiadas em dois tutores de ferro de 150 cm x 8 mm e estarão protegidas por rede de malha sol de 120 cm de altura e 40 cm de diâmetro. Durante o período de maior deslocação do inseto será colocada uma feromona.
Instalação de armadilhas para o Nemátodo	Pretende-se colocar armadilhas para captura do inseto *Monochamus galloprovincialis*, estando prevista a captura entre abril e novembro. As armadilhas serão penduradas nos ramos das árvores. Durante o período de maior deslocação do inseto será colocada uma feromona.
Destroçamento de	Operação a realizar após o corte de material lenhoso, de modo a efetuar

sobrantes	o seu corte e destroçamento, ficando este depositado no local. Esta operação promove a fertilidade do solo por incorporação de matéria orgânica, reduz o risco de incêndio pela eliminação/redução da biomassa vegetal e concentração do material combustível e contribui ainda para o controlo da erosão hídrica, diminuindo o escorrimento superficial e absorvendo o impacto da chuva. Esta operação será realizada com um estilhaçador de facas.

Operações de plantação

Marcação e Piquetagem	De modo a facilitar a armação do terreno e segundo as curvas de nível.
Ripagem	Recorrendo a *ripper* de um dente acoplado a trator de rastos de 120 a 150 hp, a uma profundidade de 50 cm. Esta operação justifica-se para facilitar a penetração das raízes e infiltração de águas no solo, formando uma zona de retenção de água e reduzindo os problemas de *stress* hídrico estival. Permitirá ainda a formação de zona de abastecimento de elementos minerais.
Armação do Terreno	Armação do terreno em vala e cômoro, recorrendo a um trator borracheiro de 90 hp com uma charrua de um ferro reversível. Preparação mecânica realizada em curva de nível, com duas passagens, em sentidos opostos, sendo a segunda ligeiramente a montante da primeira, com o objetivo de aumentar as dimensões de vala e cômoro. Esta operação melhora as condições de armazenamento de água na vala, aumentando a sua disponibilidade e, ao mesmo tempo, disponibiliza um cubo de terra em boas condições de arejamento e drenagem, influenciando o desenvolvimento das raízes nos primeiros anos de vida e a defesa contra a erosão.
Armação do terreno em montículo	Armação do terreno em “montículo”, através da criação do mesmo com areia e terra vegetal ao longo da zona de intervenção, com uma altura média de 1 m.
Plantação	A plantação será realizada manualmente com plantas com torrão, uma vez que estas conservam mais facilmente a humidade à sua volta e por isso são menos suscetíveis às crises de transplantação. As plantas serão dispostas no talude do cômoro, sensivelmente a ½ da sua altura total, disponibilizando mais água em alturas de seca e prevenindo contra o encharcamento em alturas de chuvas intensas. Nas áreas onde foi criado o montículo, as plantas serão instaladas no mesmo.

Aplicação de micorrizas	Aplicação de inoculo com ectomicorrizas florestais, em forma de gel, favorecendo a retenção de água, a captura de nutrientes, facilitando a sobrevivência nos primeiros tempos após a plantação. O inoculo aplica-se aquando da sementeira
Proteção individual de plantas	Esta proteção visa aumentar o sucesso da plantação facilitando o enraizamento, por atenuação dos efeitos resultantes das geadas, das alterações profundas de temperatura e regimes hídricos num curto espaço de tempo. Com a colocação dos ecotubos, a planta fica sujeita a um microclima que tende a favorecer o seu desenvolvimento nomeadamente no Verão, proporcionando um maior teor de humidade. Deste modo, a atuação dos ecotubos associa duas funções: proteção física da planta à ação dos herbívoros e a estimulação do crescimento e desenvolvimento devido ao microclima criado dentro do tubo. Os ecotubos a utilizar serão perfurados, biodegradáveis e com 60 centímetros de altura.
Retancha	A realizar consoante a % da taxa de mortalidade das plantas.
Sacha e amontoa	Prevê-se a realização desta nos anos de retancha, pois nesta altura o aparecimento de vegetação espontânea nas linhas de plantação é bastante comum. Operação a realizar manualmente.
Rega	Deverá ser realizada rega localizada na Primavera/Verão seguinte à plantação, para melhorar consolidação da plantação. Será realizada com cisterna de 6000 litros com apoio de duas operadoras.

Operações de exploração florestal

Descortiçamento	Deverá ser respeitada a legislação em vigor, fixada pela redação atual do Decreto-Lei n.º 169/2001, de 25 de maio. O descortiçamento será realizado com machado próprio para o efeito, sendo que este deverá ser desinfetado entre árvores.
Apanha da pinha	A colheita poderá ser mecânica ou manual, tendo como enquadramento legal o Decreto-Lei n.º 77/2015, de 12 de maio. A mesma não é permitida entre 1 de abril e 1 de dezembro.

Operações de instalação ou beneficiação de infraestruturas

Beneficiação de rede viária florestal	Pretende-se beneficiar a plataforma, através da limpeza e regularização da pavimentação degradada de modo a que os acessos estejam em boas condições de circulação. As valetas e aquedutos existentes também deverão ser beneficiados ou construídos sempre que se justifique, respetivamente, para melhorar a drenagem de águas pluviais e para que o curso das linhas de água não seja alterado.
Beneficiação de rede divisional	Abertura de faixas de interrupção total de combustível sem prejuízo da manutenção dos arvoredos de quercíneas existente, assegurando o cumprimento da legislação de proteção do Sobreiro e da Azinheira (Decreto-Lei n.º 169/2001, de 25 de maio, alterado pelo Decreto-Lei n.º 155/2004, de 30 de junho) e dando cumprimento ao anexo do Decreto-Lei n.º 17/2007, de 17 de janeiro. Os aceiros serão diferenciados em perimetrais e delimitadores de parcelas de gestão que, em conjunto com o tipo de povoamento existente, irá definir a sua largura. Em povoamentos abertos, o aceiro perimetral deverá ter 10 m, e o aceiro limitador de parcelas deverá ter entre 6 a 10 m. No caso de plantações, o aceiro perimetral deverá ter entre 10 a 20 m, enquanto que o aceiro que delimita parcelas de gestão deverá ter 10 m. A operação será realizada com grade de discos leve acoplada a um trator de potência não inferior a 90 hp.
Beneficiação das FGC das Edificações e Infraestruturas de apoio à gestão a construir	Abertura de faixas de interrupção de combustível com 50 m de largura à volta das edificações ou instalações, medida a partir da alvenaria exterior da edificação, onde se garante a remoção total ou parcial de biomassa florestal, através da afetação a usos não florestais e do recurso a determinadas atividades ou a técnicas silvícolas. A operação será realizada com grade de discos leve acoplada a um trator de potência não inferior a 90 hp.
Beneficiação da FGC da rede viária	Abertura de parcelas lineares de território com 10 m de largura para cada lado da estrada, onde se garante a remoção total ou parcial de biomassa florestal, através da afetação a usos não florestais e do recurso a determinadas atividades ou a técnicas silvícolas.
Beneficiação da FGC da rede geodésica	Abertura de faixas de interrupção de combustível com 15 m em redor da rede geodésica, onde se garante a remoção total ou parcial de biomassa florestal, através da afetação a usos não florestais e do recurso a determinadas atividades ou a técnicas silvícolas. A operação será realizada com grade de discos leve acoplada a um trator de potência não inferior a 90 hp.15 m rede
Beneficiação da FGC da rede elétrica de	Gestão do combustível numa faixa correspondente à projeção vertical dos

média tensão	cabos condutores exteriores acrescidos de uma faixa de largura não inferior a 7 m para cada um dos lados, onde se garante a remoção total ou parcial de biomassa florestal, através da afetação a usos não florestais e do recurso a determinadas atividades ou a técnicas silvícolas. A operação será realizada com grade de discos leve acoplada a um trator de potência não inferior a 90 hp.

Nota: As operações deverão respeitar as normas específicas para cada uma das parcelas de gestão, sendo apresentadas no ponto 2.6 – Calendarização das intervenções.

Os momentos das operações de gestão dos povoamentos ficam condicionados aos fatores socioeconómicos e intrínsecos da espécie, aos padrões de competição estabelecidos e às condições climáticas.

2.3 – PROGRAMA DE GESTÃO NÃO-LENHOSA E OUTROS SERVIÇOS ASSOCIADOS

Programa de gestão suberícola

Povoamento	Parcela	Modelo de silvicultura	Superfície (ha)
Povoamento misto de pinheiro bravo, pinheiro manso e sobreiro com acácias e eucaliptos dispersos.	B.3.1	PB PM1 SB1	86,21

Operações	Povoamento existente
Densidade do povoamento	Cerca de 268 árvores/ha
Limpeza de matos	Em 2027 e sucessivamente de 3 em 3 anos
Poda de formação	2027 e de 5 em 5 anos
Poda/ abate sanitário	Sempre que necessário
Tiragem de cortiça	
Desbóia	---
Cortiça secundeira	---
Cortiça amadia	2024 e sucessivamente de 9 em 9 anos
Acerto de meças	Não aplicável

2.4 – PROGRAMA DE INFRAESTRUTURAS (DFCI, REDE VIÁRIA FLORESTAL, CINEGÉTICA, SILVOPASTORÍCIA E RECREIO)

Tipo de intervenção (instalação ou beneficiação)	Ano	Unid.	Localização (parcelas)	Observações
Beneficiação da rede divisional*	2024	46510, 22 m	Todas	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Beneficiação da FGC das Edificações	2024	12,49 ha	C.1.1 E.1.1 B.1.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Beneficiação da FGC da rede viária*	2024	20,75 ha	B.1.1 B.1.2 B.2.2 B.3.1 E.1.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Beneficiação da FGC da rede de gás	2024	3,39 ha	B.1.1 B.3.1 D.1.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Beneficiação da FGC da rede elétrica de média tensão*	2024	7,17 ha	B.1.1 B.1.2 C.1.1 E.1.1 B.2.2	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Beneficiação da FGC das infraestruturas de apoio à gestão a construir	2027	0,67 ha	B.1.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Beneficiação da FGC da Rede Geodésica	2024	0,07 ha	B.1.1 B.2.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Construção de infraestruturas de apoio à gestão	2025	0,35 ha	B.1.1 D.1.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Construção de charcas	2027 /28	6,75 ha	D.1.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II
Construção de cercas	2027	7500 m	B.1.1 B.1.2 B.2.2 B.3.1 E.1.1	Ver mapa n.º 17.1 do anexo II

* Operações a realizar anualmente

2.5 – PROGRAMA DE OPERAÇÕES SILVÍCOLAS MÍNIMAS

Parcelas	Área (ha)	Periocidade	Operação
Todas	37,02	Anual	Beneficiação da rede divisional
B.1.1 E.1.1	52,64	Anual	Beneficiação das FGC
B.1.1 B.1.2 B.2.1 B.2.2 B.2.3 B.3.1 E.1.1 E.2.1 G.1.1	2158,54	3 em 3 anos	Controlo da vegetação espontânea

2.6 – CALENDARIZAÇÃO DAS INTERVENÇÕES

B.1.1	Povoamento puro de pinheiro bravo, com pinheiro manso disperso e sobreiro muito disperso.

	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização da regeneração natural* (SRN)				✓	✓	✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)						✓	✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)				✓	✓	✓	✓	✓
Correção de densidade excessiva* Pb (CDE)				✓	✓	✓		✓
Desramação* (DR)				✓	✓	✓		✓
Destroçamento de sobrantes (DS)				✓	✓	✓	✓	✓
Poda sanitária (PS)	A realizar sempre que necessário							
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Processionária* (IAPr)	A realizar sempre que necessário							
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)	✓			✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Beneficiação das FGC (BFGC)	✓		✓		✓	✓	✓	✓

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
B.1.1	Habitat **2150** Habitat **233**0 Habitat **6310** Habitats **2260** Habitat **2250** Habitat **6410** ***Armeria rouyana***	Sinalização regeneração natural	Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes em matéria de conservação (*Ulex australis subsp. welwitschianus, Stauracanthus genistoides,Thymus capitellatus, Ulex minor, Juniperus navicularis, Armeria rouyana, Corynephorus canescens* var. *maritimus)* antes de realizar qualquer intervenção.
		Controlo vegetação espontânea	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado teção do solo e fixação dunar; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual Nas áreas de ocorrência de *Armeria rouyana*, os ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho; Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual.
		Correção de densidade excessiva	Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes.
		Desramação	Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6

			anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar

B.1.2	Povoamento puro de pinheiro bravo.

	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização da regeneração natural* (SRN)				✓		✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)						✓	✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)				✓		✓	✓	✓
Correção de densidade excessiva* Pb (CDE)				✓		✓		✓
Destroçamento de sobrantes (DS)				✓		✓	✓	✓
Poda sanitária (PS)	A realizar sempre que necessário							
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Processionária (IAPr)	A realizar sempre que necessário							
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)	✓			✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
B.1.2	Habitat **2260** Habitat **2150**	Sinalização regeneração natural	-Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes em matéria de conservação (*Ulex australis subsp. welwitschianus, Stauracanthus genistoides,Thymus capitellatus, Ulex minor, Juniperus navicularis, Armeria rouyana, Corynephorus canescens* var. *maritimus)* antes de realizar qualquer intervenção.
		Correção de densidade excessiva	Promover a redução vertical e horizontal da carga combustível: desramações; controlo de densidades excessivas; controlo de vegetação espontânea; eliminação e destruição de todos os resíduos de exploração. Estas ações devem ocorrer em manchas ou faixas, de modo a garantir a irregularidade do mosaico arbustivo e permitir a renovação do banco de sementes.
		Controlo da vegetação espontânea	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual

B.2.1	Povoamento puro de pinheiro-manso (sem gestão nos últimos anos)							
	1.º Quinquénio					**2.º Quinquénio**	**3.º Quinquénio**	**4.º Quinquénio**
	2023	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2027-2031**	**2032-2036**	**2037-2041**
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natura*l (SRN)				✓		✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)				✓			✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)				✓		✓	✓	✓
Desbaste (DB)				✓			✓	
Restauração da fertilidade do solo (RFS)				✓		✓	✓	✓
Desramação* (DR)				✓			✓	
Destroçamento de sobrantes (DS)				✓		✓	✓	✓
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Processionária (IAPr)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							
Exploração Florestal								
Apanha de pinha (AP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)				✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Beneficiação das FGC (BFGC)	✓		✓		✓	✓	✓	✓

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
B.2.1	Habitat **6410** Habitat **2260** Habitat **2250** ***Armeria rouyana***	Sinalização regeneração natural	-Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes em matéria de conservação (*Ulex australis subsp. welwitschianus, Stauracanthus genistoides,Thymus capitellatus, Ulex minor, Juniperus navicularis, Armeria rouyana, Corynephorus canescens* var. *maritimus)* antes de realizar qualquer intervenção.
		Desramação	Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar
		Controlo da vegetação espontânea	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual

B.2.2	Povoamento puro de pinheiro-manso							
	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natural* (SRN)				✓		✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)				✓			✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)				✓		✓	✓	✓
Desbaste (DB)				✓			✓	
Restauração da fertilidade do solo (RFS)				✓		✓	✓	✓
Desramação* (DR)				✓			✓	
Destroçamento de sobrantes (DS)				✓		✓	✓	✓
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Processionária (IAPr)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							
Exploração Florestal								
Apanha de pinha (AP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)				✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Beneficiação das FGC (BFGC)	✓		✓		✓	✓	✓	✓

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
B.2.2	Habitat **2330** Habitat **2260** Habitat **2250** Habitat **2150** ***Armeria rouyana***	Sinalização regeneração natural	-Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes em matéria de conservação (*Ulex australis subsp. welwitschianus, Stauracanthus genistoides,Thymus capitellatus, Ulex minor, Juniperus navicularis, Armeria rouyana, Corynephorus canescens* var. *maritimus)* antes de realizar qualquer intervenção.
		Desramação	Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar
		Controlo da vegetação espontânea	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual

B.2.3	Povoamento puro de pinheiro manso jovem (Plantação)							
	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natural* (SRN)				✓	✓	✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)				✓	✓		✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)				✓	✓	✓	✓	✓
Desbaste (DB)						✓		
Restauração da fertilidade do solo (RFS)				✓	✓	✓	✓	✓
Desramação (DR)				✓	✓		✓	
Destroçamento de sobrantes (DS)				✓	✓	✓	✓	✓
Abate sanitário* (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Processionária* (IAPr)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							
Exploração Florestal								
Apanha de pinha (AP)						✓	✓	✓
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)				✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Beneficiação das FGC (BFGC)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

B.3.1	Povoamento misto de pinheiro bravo, pinheiro manso e sobreiro com acácias e eucaliptos dispersos.							
	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natural* (SRN)				✓	✓	✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)				✓	✓	✓	✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)				✓	✓	✓	✓	✓
Correção de densidade excessiva Pb (CDE)				✓	✓		✓	
Desbaste* (DB)				✓	✓			
Restauração da fertilidade do solo (RFS)				✓	✓	✓	✓	✓
Desramação* (DR)				✓	✓		✓	
Poda de formação Sb (PF)				✓	✓		✓	
Destroçamento de sobrantes (DS)				✓	✓	✓	✓	✓
Controlo de espécies invasoras (CEI)				✓	✓	✓	✓	✓
Poda sanitária (PS)	A realizar sempre que necessário							
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Processionária (IAPr)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Plátipo (IAP)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							

Exploração Florestal								
Apanha de pinha (AP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Descortiçamento		✓					✓	✓
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)	✓			✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
B.3.1.	Habitat **2260** Habitat **2150** Habitat **6310** Habitat **2250** Habitat **6410** Habitat **2330**	Controlo vegetação espontânea	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual
		Desramação	Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar
		Sinalização regeneração natural	-Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes em matéria de conservação

			(*Ulex australis subsp. welwitschianus, Stauracanthus genistoides,Thymus capitellatus, Ulex minor, Juniperus navicularis, Armeria rouyana, Corynephorus canescens* var. *maritimus)* antes de realizar qualquer intervenção.

D.1.1	Povoamento puro de pinheiro manso a converter em área agrícola

	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Remoção de cepos (RC)				✓	✓			
Poda sanitária (PS)	A realizar sempre que necessário							
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Exploração Florestal								
Corte de pinheiro manso (Cpm)			✓	✓				
Corte de pinheiro bravo (Cpb)			✓	✓				
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)			✓			✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

*A efetuar sempre que necessário.

E.1.1	Área de matos com pinheiro bravo e pinheiro manso disperso.							
	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natural* (SRN)				✓	✓	✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)				✓	✓		✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)			✓	✓		✓	✓	✓
Desramação* (DR)					✓		✓	
Destroçamento de sobrantes (DS)					✓	✓	✓	✓
Abate sanitário* (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Processionária* (IAPr)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							
Exploração Florestal								
Apanha de pinha (AP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)	✓			✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Beneficiação das FGC (BFGC)	✓		✓		✓	✓	✓	✓

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
E.1.1	Habitat **2260** Habitat **2150** Habitat **2330** Habitat **2250** Habitat **6410** *Armeria rouyana*	Controlo vegetação espontânea	-Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual Nas áreas de ocorrência de *Armeria rouyana*, os ciclos de limpeza florestal deverão ocorrer de 3 a 5 anos, somente através da utilização de corta-mato e evitando intervenções no período compreendido entre novembro e julho; -Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual
		Desramação	Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar
		Sinalização regeneração natural	-Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes em matéria de conservação (*Ulex australis subsp. welwitschianus, Stauracanthus genistoides,Thymus capitellatus, Ulex minor, Juniperus navicularis, Armeria rouyana, Corynephorus canescens* var. *maritimus)* antes de realizar qualquer intervenção.

E.2.1	Área de matos com pinheiro manso disperso							
	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natural (SRN)			✓	✓		✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)							✓	✓
Controlo vegetação espontânea (CVE)			✓			✓	✓	✓
Restauração da fertilidade do solo (RFS)			✓			✓	✓	✓
Desramação (DR)			✓				✓	
Desbaste (DB)			✓					
Destroçamento de sobrantes (DS)			✓			✓	✓	✓
Abate sanitário* (AS)	A realizar sempre que necessário							
Instalação de armadilhas Nemátodo (IANMP)	A realizar sempre que necessário							
Exploração Florestal								
Apanha de pinha (AP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Instalação/benefic. de infraestruturas								
Beneficiação rede viária florestal (BRVF)	✓			✓		✓	✓	✓
Beneficiação da rede divisional (BRD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Beneficiação das FGC (BFGC)	✓		✓		✓	✓	✓	✓

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
E.2.1	Habitat **2260** Habitat **2150** Habitat **2330** Habitat **2250** Habitat **6410**	Controlo vegetação espontânea	-Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual -Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual

F.1.1	Área a converter em faixa de proteção à N253

	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natural* (SRN)			✓	✓		✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)			✓	✓		✓	✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)			✓	✓		✓	✓	✓
Controlo de espécies invasoras (CEI)			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Desramação* (DR)			✓	✓		✓	✓	✓
Destroçamento de sobrantes* (DS)			✓	✓		✓	✓	✓
Poda sanitária (PS)	A realizar sempre que necessário							
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Operações de plantação								
Marcação e Piquetagem (PQ)			✓	✓				
Armação do terreno em montículo (AT)			✓	✓				
Plantação no montículo (PL)			✓	✓				
Aplicação de micorrizas (AM)			✓	✓				
Proteção individual de plantas (PIP)			✓	✓				
Retancha (RT)				✓	✓	✓		
Sacha e amontoa (SA)				✓	✓	✓		

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
F.1.1	Habitat **2260** Habitat **2150** Habitat **2330** Habitat **6310** Habitat **6410**	Controlo vegetação espontânea	-Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual -Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; - Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual

G.1.1	Área de matos a converter em povoamento puro de pinheiro manso

	1.º Quinquénio					2.º Quinquénio	3.º Quinquénio	4.º Quinquénio
	2023	2024	2025	2026	2027	2027-2031	2032-2036	2037-2041
Beneficiação de povoamentos								
Sinalização regeneração natural* (SRN)			✓			✓	✓	✓
Seleção de árvores de futuro (SAF)			✓			✓	✓	✓
Controlo vegetação espontânea* (CVE)			✓			✓	✓	✓
Desramação* (DR)			✓			✓	✓	✓
Destroçamento de sobrantes* (DS)			✓			✓	✓	✓
Poda sanitária (PS)	A realizar sempre que necessário							
Abate sanitário (AS)	A realizar sempre que necessário							
Operações de plantação								
Marcação e Piquetagem (PQ)			✓	✓	✓	✓	✓	
Armação do terreno (AT)			✓	✓	✓	✓	✓	
Ripagem (RP)			✓	✓	✓	✓	✓	
Plantação (PL)			✓	✓	✓	✓	✓	
Aplicação de micorrizas (AM)			✓	✓	✓	✓	✓	
Proteção individual de plantas (PIP)			✓	✓	✓	✓	✓	
Retancha (RT)				✓	✓	✓	✓	✓
Sacha e amontoa (SA)				✓	✓	✓	✓	✓
Rega		✓	✓	✓				

Nota: as operações assinaladas (*) deverão respeitar as seguintes normas de gestão:

Parcela	Altos Valores de Conservação	Operação	Orientação de gestão
G.1.1	Habitat **2260** Habitat **2150** Habitat **2250** Habitat **2330**	Controlo vegetação espontânea	Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado para proteção do solo e fixação dunar; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual Efetuar desmatações seletivas, promovendo o mosaico vegetacional; Garantir a desmatação mínima, apenas em faixas ou manchas e efetuada somente com recurso a corta-mato com sistema de corte elevado; Controlar a flora alóctone somente com recurso a maquinaria moto manual
		Desramação	Efetuar ciclos de desramações de acordo com as boas práticas silvícolas (5/6 anos, 10/12 anos e 20/25 anos) de modo a garantir adequada configuração estrutural do povoamento para que sejam preservadas as funções de proteção do solo e fixação dunar
		Sinalização regeneração natural	-Sinalizar os núcleos de vegetação mais importantes em matéria de conservação (*Ulex australis subsp. welwitschianus, Stauracanthus genistoides,Thymus capitellatus, Ulex minor, Juniperus navicularis, Armeria rouyana, Corynephorus canescens* var. *maritimus)* antes de realizar qualquer intervenção.

ANEXO II

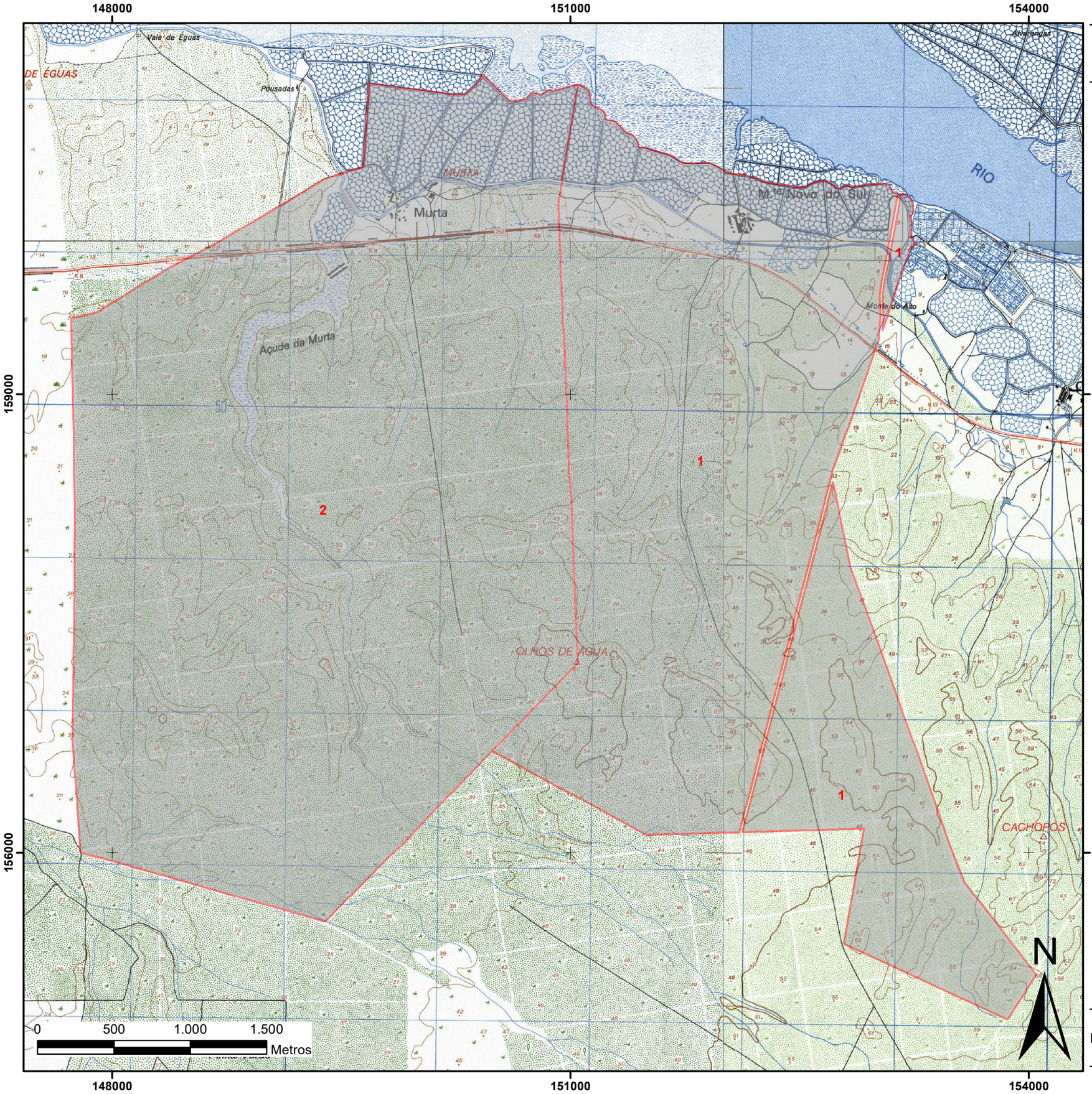
CARTOGRAFIA

- Mapa n.º 1 – Implantação em Carta Militar
- Mapa n.º 2 – Exposição
- Mapa n.º 3 – Altimetria
- Mapa n.º 4 – Tipo de Solo
- Mapa n.º 5 – Carta Litológica
- Mapa n.º 6 – Capacidade de Uso do Solo
- Mapa n.º 7 – Risco de Incêndio
- Mapa n.º 8 – Perigosidade de Incêndio
- Mapa n.º 9.1 – Restrições de Utilidade Pública
- Mapa n.º 9.2 - Habitats
- Mapa n.º 10 – Enquadramento no PROF
- Mapa n.º 11 – Infraestruturas DFCI
- Mapa n.º 12 – Infraestruturas de Apoio à Gestão
- Mapa n.º 13 – Caracterização Socioeconómica
- Mapa n.º 14 – Uso do Solo
- Mapa n.º 15 – Implantação da UG em Ortofotomapa
- Mapa n.º 16 – Compartimentação da UG em Parcelas de Gestão
- Mapa n.º 17.1 – Principais Ações a Executar no Curto Prazo
- Mapa n. º17.2 - Habitats por parcelas de gestão

Nota: Os mapas foram executados no seguinte sistema de coordenadas:

Nome: ETRS_1989_Portugal_TM06
Projeção cartográfica: Transversa de Mercator
Elipsóide de referência: GRS80

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 1 - Implantação em Carta Militar



Legenda

Limita da UG (2399,18 ha)

1 - Herdade do Monte Novo do Sul; Secção R; Art.n.º 2
2 - Herdade da Murta; Secção Q; Art.n.º 1

Carta Militar n.º 466; 467; 475; 476

Setúbal; Alcácer do Sal;
União das freguesias de Alcácer do Sal
(Santa Maria do Castelo e Santiago) e Santa Susana

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia

148000

151000

154000

159000

156000

0 500 1.000 1.500

Metros

N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 2 - Exposição

Legenda

Limite da UG

Exposição

- Plano
- Norte
- Nordeste
- Este
- Sudeste
- Sul
- Sudoeste
- Oeste
- Noroeste
- Norte

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia

148000 151000 154000

159000

156000

0 500 1.000 1.500 Metros

N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 3 - Altimetria

Legenda

Limite da UG

Altimetria

- 0 m
- 10 m
- 20 m
- 30 m
- 40 m
- 50 m
- 60 m

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia

148000
151000
154000
159000
156000
N
0 500 1.000 1.500
Metros

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 4 - Tipo de Solo

Legenda

Limite da UG

Tipo de Solo

Podzóis órticos
Solonchaks gleizados

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia

148000
151000
154000
159000
156000
0
500
1.000
1.500
Metros
N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 5 - Litologia

Legenda

Limite da UG

Litologia

Aluviões

Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas

Data 05/2023

Escala Numérica 1:25.000

forestagri engenharia

148000
151000
154000
159000
156000
0
500
1.000
1.500
Metros
N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 6 - Capacidade de Uso do Solo

Legenda

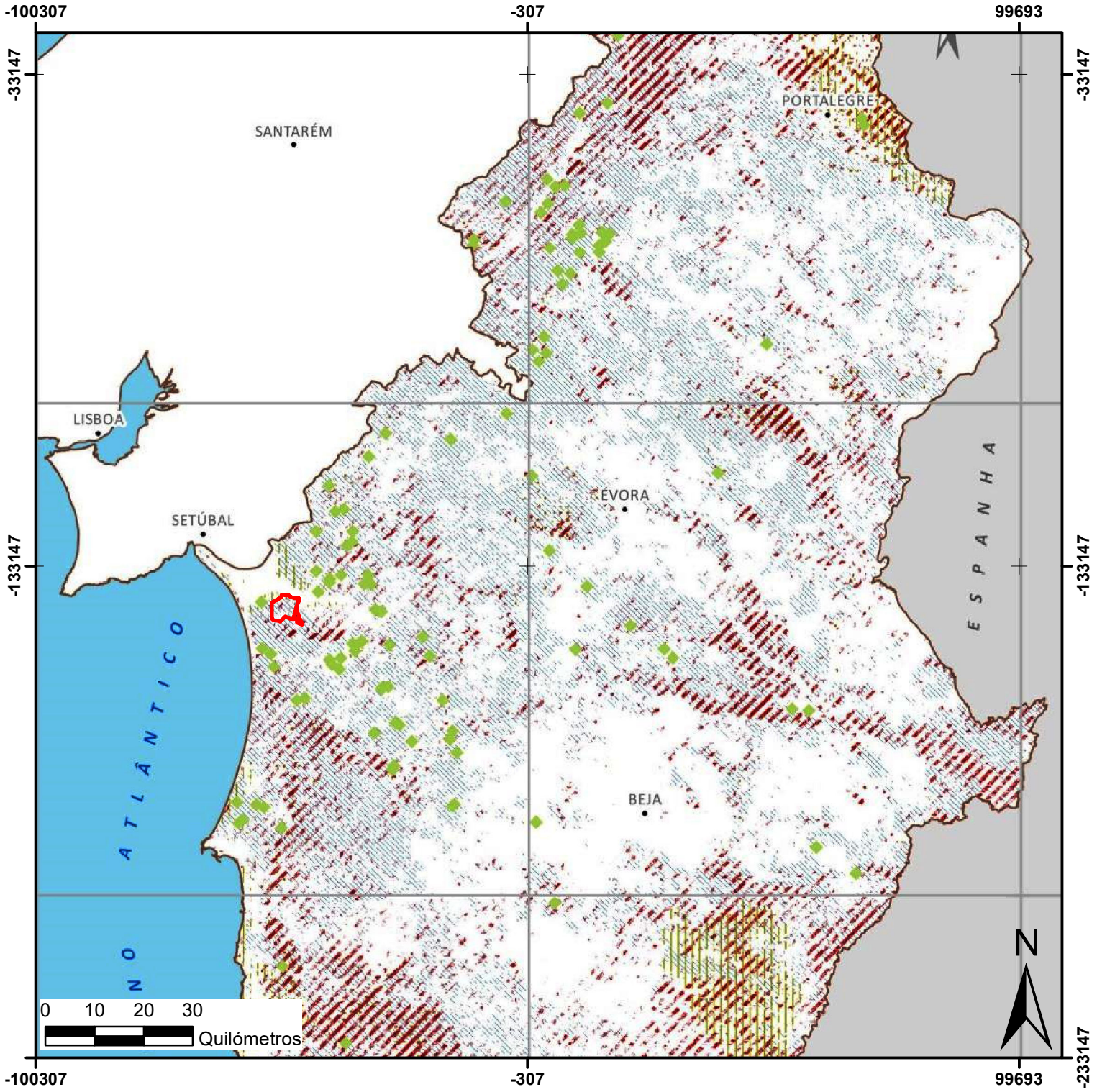
Limite da UG

Capacidade de Uso do Solo

- Classe C - Condicionada por limitações acentuadas
- Classe D - Limitações severas
- Classe E - Limitações muito severas
- Classes C+D ou E

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia



Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Mapa n.º 7 - Áreas Florestais Sensíveis

Legenda

Limite da UG

Legenda

Limite PROF

ÁREAS FLORESTAIS SENSÍVEIS

Perigosidade de incêndio florestal

Alta e muito alta

Suscetibilidade a pragas e doenças

Risco de erosão

Elevado

Importância ecológica

Ecossistemas florestais de elevado valor natural

Importância social e cultural

Povoamentos com elevado potencial valor cultural e espiritual

Data 05/2023

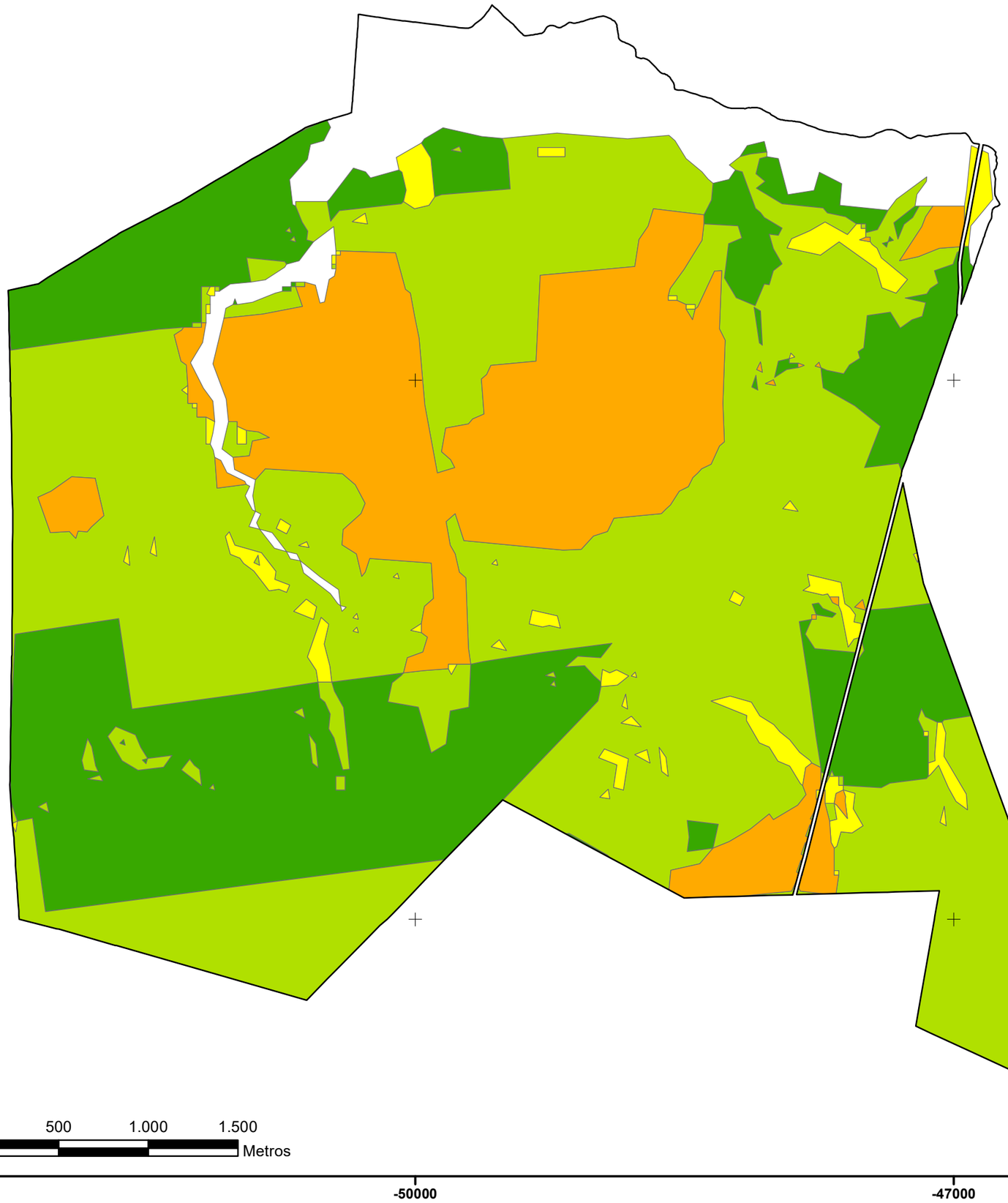
Escala Numérica 1:1.106.000

forestagri engenharia

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 8 - Perigosidade de Incêndio

-50000 -47000

-141000 -144000



Legenda

Limite da UG

Perigosidade de Incêndio

- Muito baixa (25,74%)
- Baixa (53,82%)
- Média (2,30%)
- Elevada (18,13%)

N

0 500 1.000 1.500
Metros

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia

-52579 -49579 -46579

-139430

-142430

-145430

0 500 1.000 1.500 Metros

N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 9.1 - Restrições de Utilidade Pública

Legenda

Limite da UG

REN (42,35 ha)

- REN - cursos de água e respetivos leitos e margens (36,84 ha)
- REN - sapais (0,14 ha)
- REN - zonas ameaçadas pelas cheias não classificadas como zonas adjacentes nos termos da Lei da Titularidade dos Recursos Hídricos (2,88 ha)
- REN - águas de transição e respetivos leitos, margens e faixas de proteção (2,48 ha)

- RAN (233,88 ha)
- Perímetro de rega do Vale do Sado (184,47 ha)
- Faixa de proteção dos locais arqueológicos (0,39 ha)

- Rede elétrica de média tensão (5327,76 m)

- Corredor ecológico (442,99 ha)

- ZEC da Comporta/Galé - PTCON0034 (1952,42 ha)
- ZEC do Estuário do Sado - PTCON0011 (446,76 ha)

- ZPE do Açude da Murta - PTZPE0012 (493,75 ha)
- ZPE do Estuário do Sado - PTZPE0011 (311,57 ha)

- Local arqueológico - CNS - 16974
- Local arqueológico - CNS - 38635

- Rede geodésica - Olhos de Água

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 9.2 - Habitats

-52316 -49316 -46316

-139408 -142408 -145408

Legenda

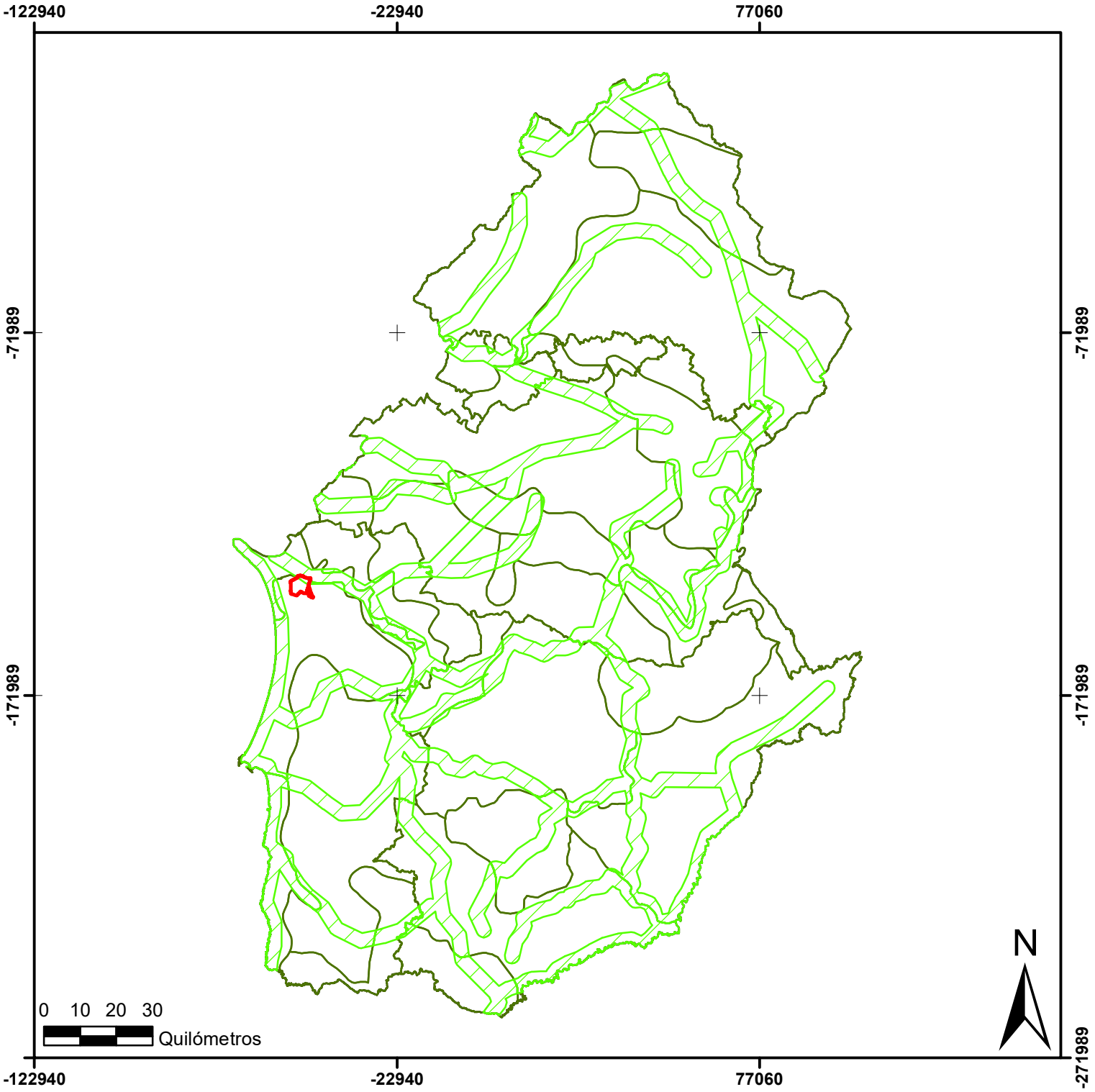
- Limite da UG
- Áreas de proteção e restauro (271,71 ha)
- Habitat - 1140+1420+1430 (0,42 ha)
- Habitat - 2150* (138,52 ha)
- Habitat - 2150*+2250* (0,66 ha)
- Habitat - 2150*+2330 (3,04 ha)
- Habitat - 2150*+6410 (1,70 ha)
- Habitat - 2250* (70,11 ha)
- Habitat - 2250*+2150* (1,88 ha)
- Habitat - 2250*+2260 (1,81 ha)
- Habitat - 2250*+2260+2150* (1,03 ha)
- Habitat - 2250*+2260+2330 (0,18 ha)
- Habitat - 2250*+2330 (0,40 ha)
- Habitat - 2260 (1450,80 ha)
- Habitat - 2260+2150* (86,50 ha)
- Habitat - 2260+2150*+2250* (3,15 ha)
- Habitat - 2260+2150deg (2,75 ha)
- Habitat - 2260+2250* (14,62 ha)
- Habitat - 2260+2330 (75,43 ha)
- Habitat - 2260deg (120,20 ha)
- Habitat - 2330 (19,77 ha)
- Habitat - 2330+2260deg (4,94 ha)
- Habitat - 6310 (68,53 ha)
- Habitat - 6310+2150* (1,34 ha)
- Habitat - 6310+2260 (0,90 ha)
- Habitat - 6410 (1,22 ha)

N

0 500 1 000 1 500
Metros

Data 03/2025 **Escala Numérica 1:24 000**

forestagri engenharia



Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Mapa n.º 10 - Enquadramento no PROF

Legenda

Limite da UG

PROF do Alentejo

SRH - Pinhais do Alentejo Litoral; Estuário e Vale do Baixo Sado

Corredor ecológico

Data 05/2023

Escala Numérica 1:1.500.000

forestagri engenharia

-52285 -49285 -46285

-139342

-142342

-145342

0 500 1 000 1 500 Metros

N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 11 - Infraestruturas DFCI

Legenda

- Limite da UG
- Rede divisional (54250,16 m)
- Rede viária (8689,18 m)
- FGC das edificações (12,49 ha)
- FGC da rede viária (17,16 ha)
- FGC da rede de gás (3,39 ha)
- FGC da rede elétrica de média tensão (7,17 ha)
- Mosaico de parcelas de gestão de combustível (2,26 ha)
- FGC da rede geodésica (0,07 ha)
- Faixa de proteção dos locais arqueológicos (0,39 ha)
- Incêndio - 2002 (482,56 ha)
- Incêndio - 2010 (195,56 ha)
- Canal de rega (6,10 ha)
- Açude da Murta (25,66 ha)
- RPA
- Charcas a construir (6,75 ha)

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:24 000**

forestagri engenharia

-52579 -49579 -46579

-139430

-142430

-145430

0 500 1 000 1 500

Metros

N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 12 - Infraestruras de Apoio à Gestão

Legenda

- Limite da UG
- Charcas a construir (6,75 ha)
- Infraestruturas de apoio à gestão a construir (0,35 ha)
- Canal de rega (6,10 ha)
- Açude da Murta (25,66 ha)
- Infraestruturas de apoio à gestão existentes (1,50 ha)
- Cercas existentes (19,01 km)
- Cercas a construir (7,15 km)

Data 05/2026 **Escala Numérica 1:25 000**

forestagri engenharia

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 13 - Caracterização Socioeconómica

-52326 -49326 -46326

-139396

-142396

-145396

Legenda

- Limite da UG
- Função de produção
- Função de conservação
- Função de proteção

N

0 500 1 000 1 500
Metros

Data 05/2026 **Escala Numérica 1:24 000**

forestagri engenharia

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 14 - Uso do Solo

-52399 -49399 -46399

-139358 -142358 -145358

Legenda

- Agrícola (178,50 ha)
- Açude da Murta (25,66 ha)
- Caminho de acesso (3,55 ha)
- Canal de rega (6,10 ha)
- Florestal (1215,25 ha)
- Incultos (4,70 ha)
- Infraestruturas de Apoio à gestão (1,50 ha)
- Local arqueológico 0,01 ha)
- Matos (949,23 ha)
- N253 (4,81 ha)
- Ruínas (0,20 ha)
- Zona de Encharcamento (6,69 ha)
- Área envolvente às edificações (2,90 ha)

0 500 1,000 1,500
Metros

N

Data 02/2025 **Escala Numérica 1:25,000**

forestagri engenharia

-52579 -49579 -46579

-139430

-142430

-145430

0 500 1.000 1.500 Metros

N

Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 15 - Implantação em Ortofotomapa

Legenda

Limite da UG (2399,18 ha)

Data 05/2023 **Escala Numérica 1:25.000**

forestagri engenharia

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 16 - Compartimentação da UG em Parcelas de Gestão

-52317 -49317 -46317

-139432

-142432

-145432

Legenda

- limite da UG (2399,18 ha)
- A.1.1 - Área agrícola de regadio - Arrozais (166,39 ha)
- A.2.1 - Área agrícola de sequeiro (11,56 ha)
- B.1.1 - Povoamento puro de Pb com Pm disperso e Sb muito disperso (545,98 ha)
- B.1.2 - Povoamento puro de Pb (8,90 ha)
- B.2.1 - Povoamento puro de Pm (plantação) (254,30)
- B.2.2 - Povoamento puro de Pm (plantação) (135,38 ha)
- B.2.3 - Povoamento puro de Pm jovem (plantação) (5,59 ha)
- B.3.1 - Povoamento misto de Pb com Pm e Sb Ac e Ec disperso (86,21 ha)
- C.1.1 - Galeria Ripícola (4,53 ha)
- D.1.1 - Área a converter para cultura agrícola (302,90 ha)
- E.1.1 - Área de matos com Pb e Pm disperso (573,55 ha)
- E.2.1 - Área de matos com Pm disperso (116,80 ha)
- F.1.1 - Área a converter em faixa de proteção à N253 (13,86 ha)
- G.1.1 - Área de Matos a converter em Povoamento puro de Pm (110,54 ha)
- Zona de Encharcamento (6,48 ha)

0 500 1 000 1 500 Metros

N

Source: Esri, Vantor, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

Data 05/2026 **Escala Numérica 1:24 000**

forestagri engenharia

-52303 -49303 -46303

-139430

-142430

-145430

0 500 1 000 1 500 Metros

N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 17.1 - Principais Ações a Executar no Curto Prazo

Legenda

- limite da UG (2399,18 ha)
- Rede viária (226809,41 m)
- FGC das edificações (12,49 ha)
- FGC da rede viária (17,16 ha)
- FGC da rede de gás (3,39 ha)
- FGC da rede elétrica de média tensão (7,17 ha)
- Mosaico de parcelas de gestão de combustível (2,26 ha)
- Rede Divisional (52886,68 m)
- Cercas a cosntruir (7,15 km)
- B.1.1 - Povoamento puro de Pb com Pm disperso e Sb muito disperso (545,98 ha)
- B.1.2 - Povoamento puro de Pb (8,90 ha)
- B.2.1 - Povoamento puro de Pm (plantação) (254,30 ha)
- B.2.2 - Povoamento puro de Pm (plantação) (135,38 ha)
- B.2.3 - Povoamento puro de Pm jovem (plantação) (5,59 ha)
- B.3.1 - Povoamento misto de Pb com Pm e Sb Ac e Ec disperso (86,21 ha)
- C.1.1 - Galeria Ripícola (4,53 ha)
- D.1.1 - Área a converter para cultura agrícola (302,90 ha)
- E.1.1 - Área de matos com Pb e Pm disperso (573,55 ha)
- E.2.1 - Área de matos com Pm disperso (116,80 ha)
- F.1.1 - Área a converter em faixa de proteção à N253 (13,86 ha)
- G.1.1 - Área de Matos a converter em Povoamento puro de Pm (110,54 ha)
- Infraestruturas de Apoio a construir (0,35 ha)
- Charcas a construir (6,75 ha)
- FGC da rede geodésica (0,07 ha)
- Faixa de proteção dos locais arqueológicos (0,39 ha)

Data 05/2026 **Escala Numérica 1:24 000**

forestagri engenharia

-52478 -49478 -46478

-139587

-142587

0 500 1 000 1 500

Metros

N

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo

Mapa n.º 17.2 - Habitat's por Parcelas de Gestão

Legenda

- Limite da UG

- B.1.1, 2150*
- B.1.1, 2150*+2330
- B.1.1, 2150*+6410
- B.1.1, 2250*
- B.1.1, 2250*+2150*
- B.1.1, 2250*+2260
- B.1.1, 2250*+2260+2150*
- B.1.1, 2250*+2260+2330
- B.1.1, 2250*+2330
- B.1.1, 2260
- B.1.1, 2260+2150*
- B.1.1, 2260+2150*+2250*
- B.1.1, 2260+2250*
- B.1.1, 2260+2330
- B.1.1, 2260deg
- B.1.1, 2330
- B.1.1, 6310
- B.1.2, 2150*
- B.1.2, 2260
- B.2.1, 2150*
- B.2.1, 2250*
- B.2.1, 2260
- B.2.1, 2260+2150*
- B.2.1, 2260deg
- B.2.1, 6410
- B.2.2, 2150*
- B.2.2, 2150*+2250*
- B.2.2, 2250*
- B.2.2, 2250*+2260
- B.2.2, 2260
- B.2.2, 2260+2150deg
- B.2.2, 2260+2330
- B.2.2, 2260deg
- B.2.2, 2330
- B.2.2, 6310
- B.2.3, 2260deg
- B.3.1, 2150*
- B.3.1, 2150*+6410
- B.3.1, 2250*
- B.3.1, 2260
- B.3.1, 2260+2150*
- B.3.1, 2260+2330
- B.3.1, 2260deg
- B.3.1, 6310
- B.3.1, 6310+2150*
- B.3.1, 6310+2260
- C.1.1, 2250*
- C.1.1, 2260
- C.1.1, 2260deg
- C.1.1, 6310
- E.1.1, 2150*
- E.1.1, 2150*+2250*
- E.1.1, 2250*
- E.1.1, 2260
- E.1.1, 2260+2150*
- E.1.1, 2260+2150*+2250*
- E.1.1, 2260+2250*
- E.1.1, 2260deg
- E.1.1, 2330
- E.1.1, 2330+2260deg
- E.1.1, 6410
- E.2.1, 2150*
- E.2.1, 2250*
- E.2.1, 2250*+2150*
- E.2.1, 2250*+2260
- E.2.1, 2250*+2260+2330
- E.2.1, 2260
- E.2.1, 2260+2150deg
- E.2.1, 2260+2330
- E.2.1, 2260deg
- E.2.1, 6410
- F.1.1, 2150*
- F.1.1, 2150*+6410
- F.1.1, 2260
- F.1.1, 2260+2330
- F.1.1, 2260deg
- F.1.1, 2330
- F.1.1, 6310
- F.1.1, 6310+2150*
- F.1.1, 6410
- G.1.1, 2150*
- G.1.1, 2250*
- G.1.1, 2250*+2150*
- G.1.1, 2260
- G.1.1, 2260+2150*
- G.1.1, 2330

05/2026 **Escala Numérica 1:25 000**

forestagri engenharia

-145587

-52579 -49579 -46579

-139430

-142430

-145430

0 500 1 000 1 500 Metros

N

Source: Esri, Vantor, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

Plano de Gestão Florestal das Herdades de Murta e Monte Novo
Mapa n.º 18 - Zonas de Caça

Legenda

limite da UG

Zonas de caça

ZCT DO MONTE NOVO DO SUL

ZCT HERDADE DA MURTA

Data 05/2026 **Escala Numérica 1:25 000**

forestagri engenharia

ANEXO III

Normas genéricas relativas à fitossanidade

A ausência de adaptação das espécies florestais ao meio ambiente, às más técnicas culturais e de exploração praticadas, às secas e aos desequilíbrios no ecossistema, constituem fatores que contribuem para o desenvolvimento de pragas e doenças nos espaços florestais. A par dos parasitas primários, existem muitas espécies, cujo comportamento é habitualmente parasita secundário e que podem tornar-se altamente prejudiciais se as condições de alimento e habitat lhes forem favoráveis.

A ocorrência de pragas e doenças é responsável por múltiplos danos nas espécies florestais, provocando o seu enfraquecimento e por vezes a sua destruição total. Os maiores prejuízos registam-se quase sempre em povoamentos debilitados, afetando sobretudo a valorização do material lenhosos e produtos associados. Acresce ainda que o uso público de espaços florestais ou com eles relacionados pode ser posto em causa, podendo, no limite, causar problemas de saúde pública.

Importa salientar que a utilização de uma metodologia pré-definida e credível permite também evitar interpretações distintas. Em Portugal, podem ser preconizados alguns meios de luta (química, biotécnica e cultural), apesar do reduzido número de alternativas disponíveis para o controlo das populações de pragas e doenças na floresta. A tomada de decisão relativa à intervenção deve ser suportada pelo Grau de Perigosidade verificado. Os meios de luta passíveis de serem utilizados no controlo das pragas e doenças da floresta são de um modo geral escassos. Em Portugal, a situação agrava-se um pouco mais, já que muitos dos produtos usados internacionalmente carecem, no nosso país, de homologação.

Qualquer intervenção deve ainda realizar-se de acordo com a legislação em vigor.

Normas genéricas de intervenção

- Selecionar para cada situação ecológica as espécies florestais a ela adequadas.
- Efetuar as intervenções culturais nos povoamentos em épocas e períodos em que os riscos de natureza sanitária possam ser minimizados.
- Evitar a continuidade em áreas de monocultura florestal, por exemplo tirando partido da fisiografia do relevo e diversificando o coberto florestal nas linhas de água e zonas baixas, de acordo com normas de arborização adequadas a esses locais e já referidas.
- Ponderar, quando técnica e economicamente adequado, a opção por composições mistas e estruturas irregulares dos povoamentos, em princípio menos vulneráveis à generalização dos danos causados por pragas e doenças.
- Destruir o material vegetal de pequenas dimensões remanescente nas áreas ardidas, de preferência através de trituração, removendo-o ou procedendo à sua incorporação no solo, quando esta última alternativa for técnica e economicamente razoável.
- Nas zonas de incêndio, devem extrair-se as árvores queimadas e as árvores “afogueadas”, estas últimas numa faixa de 20 a 50 m conforme a violência do incêndio; estas são árvores

de grande risco de ataque. Estas parcelas devem ser mantidas em observação pois são mais frequentes os ataques de escolitídeos, sobretudo da hilésina;

- Monitorizar as áreas ardidas quanto à ocorrência de insetos e fungos em árvores sobreviventes, com particular ênfase na presença e importância de populações de insetos escolitídeos.
- Remover dos povoamentos árvores mortas de pé e afetadas por incêndios, mutilações físicas, pragas e doenças criptogâmicas, sempre que a presença destas implique riscos para a sanidade dos povoamentos, mas tendo em conta que a sua manutenção, desde que os riscos sanitários não se manifestem ou estejam controlados, contribui decisivamente para a diversidade biológica dos povoamentos florestais.
- Remover de imediato as árvores atacadas do povoamento, antes do período de emergência dos insetos
- Proceder à incorporação no solo, ou à trituração ou combustão no local seguida de distribuição à superfície do solo, dos resíduos de exploração florestal, como alternativa à sua remoção e destruição noutro local, com reflexos negativos na exportação de nutrientes e matéria orgânica.
- Desinfetar com produtos adequados os equipamentos e materiais usados em povoamentos em mau estado sanitário.
- Sempre que, por razões fitossanitárias, seja tecnicamente recomendável o recurso a pesticidas, deve ponderar-se a possibilidade de recurso a métodos e produtos de luta biológica e respeitar-se os princípios da proteção integrada, garantindo ainda que a aplicação de tais produtos seja efetuada por pessoal com formação adequada e no respeito pelas normas de armazenamento, transporte e aplicação de cada produto.

Normas específicas para o nemátodo da madeira do pinheiro (*Bursaphelenchus xylophilus*)

O Nemátodo da Madeira do Pinheiro (NMP) *Bursaphelenchus xylophilus* foi detetado em Portugal, em maio de 1999, em pinhais de *Pinus pinaster* da região de Setúbal, no entanto, tem como hospedeiros árvores de coníferas dos géneros *Abies* Mill., *Cedrus* Trew, *Larix* Mill, *Picea* A. Dietr., *Pinus* L., *Pseudotsuga* Carr., e *Tsuga* Carr., com exceção dos seus frutos e sementes. A transmissão do NMP de uma árvore para outra é feita por um inseto vetor tendo sido identificado para Portugal o Longicórnio do pinheiro o *Monochamus galloprovincialis* Ol. O nemátodo penetra nas árvores através das feridas provocadas pela armadura bucal do inseto vetor aquando do seu período de alimentação.

A presença deste parasita, classificado como organismo de quarentena pela legislação comunitária (Diretiva 2000/29/CE, de 8 de maio) no território de um Estado Membro, obriga o mesmo a notificar de imediato a sua ocorrência à Comissão Europeia, assim como a tomar medidas específicas de controlo que impeçam a sua disseminação pelo restante espaço europeu.

Sendo o Pinheiro bravo uma espécie florestal com grande expressão territorial em Portugal Continental, o Estado Português e os agentes económicos da fileira do pinho, viram-se confrontados com uma situação de extrema gravidade cuja rápida resolução foi assumida com a máxima prioridade, envolvendo numa parceria, a Administração Pública e as organizações do sector florestal com interesse territorial e económico na matéria.

Para esse efeito foi implementado desde novembro de 1999, o Programa Nacional de Luta Contra o Nemátodo da Madeira do Pinheiro – PROLUNP. Como resultado, foi criado um quadro legislativo específico que assegura o enquadramento legal das medidas de controlo fitossanitário necessárias para a minimização do risco de dispersão do NMP no território nacional e, consequentemente, permite a manutenção da atividade da fileira florestal e da indústria transformadora de madeira de coníferas. Ao nível Europeu foi criado um Grupo de Trabalho para o NMP, no seio do Comité Fitossanitário Permanente da Comissão Europeia, constituído por peritos nacionais e internacionais com conhecimento na matéria, com o objetivo de efetuar uma análise profunda às ações desenvolvidas até à data, identificar os aspetos críticos e propor alternativas e/ou medidas acessórias, que tornem expectável e efetiva a erradicação do NMP. Acontece, que apesar do bom trabalho executado por Portugal, reconhecido pelas missões de Inspeção realizadas por esse Comité, o número de árvores observadas com sintomas de declínio.

A Zona de Restrição do Nemátodo da Madeira do Pinheiro é a região do país que engloba a zona afetada pelo NMP e a zona tampão, estabelecida na sua envolvente como medida de segurança. Nesta zona realizam-se o recenseamento e eliminação de todas as árvores com sintomas de declínio, bem como a avaliação qualitativa da evolução espaço-temporal da doença, o controlo do inseto vetor do NMP e a criação de uma barreira natural isenta de hospedeiros do NMP.

Normas de intervenção ativa na Zona de Restrição

- Plantação de espécies coníferas não suscetíveis de hospedarem o nemátodo da madeira do pinheiro e o seu inseto vetor, bem como de espécies folhosas.
- Preferência por plantações mistas de espécies suscetíveis e não suscetíveis, quando por impossibilidade de plantação de espécies não hospedeiras do nemátodo.
- Monitorização do fenómeno, através de uma ação de prospeção de coníferas hospedeiras que apresentam sintomas de declínio.
- Eliminação de todas as árvores detetadas com sintomas de declínio durante a fase de prospeção (monitorização), colocando-as em destino autorizado, de modo a ser assegurado o processamento de todas as árvores, de acordo com a legislação vigente e garantindo-se a eliminação total dos sobrantes resultantes dos cortes realizados.
- Utilização de ações preventivas em povoamentos de espécies florestais suscetíveis, com recurso à utilização de armadilhas iscadas com atrativos.

- Estabelecimento de faixa de contenção fitossanitária, com o objetivo de criar uma zona livre de hospedeiros capazes de albergar a descendência de insetos vetor do nemátodo da madeira do pinheiro. As árvores serão eliminadas por um período de 2 a 3 anos, começando pelo sector sudoeste da zona de restrição.

Restrições

- Não fomentar a plantação de áreas extensivas de povoamentos puros de espécies suscetíveis de hospedarem o nemátodo da madeira do pinheiro e o seu inseto vetor.
- Condicionar/Articular os planos e autorizações de corte em áreas de forte concentração de coníferas hospedeiras com sintomas de declínio, de forma a potenciar ações de captura massiva do inseto vetor.
- Cumprir as disposições da legislação específica, nomeadamente a Portaria n.º 103/2006, de 6 de fevereiro, que estabelece medidas extraordinárias de proteção fitossanitária indispensáveis para o combate ao nemátodo da madeira do pinheiro e seu inseto vetor, de modo a evitar a sua dispersão e permitir a sua erradicação do território nacional.

Normas específicas para a processionária do pinheiro (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff)

A processionária do pinheiro (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) é um inseto desfolhador, que pode parasitar todas as espécies de *Pinus* e *Cedrus*, podendo os seus ataques variarem de intensidade. Quando desfolhadas, as árvores exibem menores crescimentos e ocorre uma quebra na produção lenhosa. No entanto, à exceção de ataques sucessivos em árvores jovens, estas geralmente recuperam e não morrem. Em termos de saúde pública, a processionária pode constituir um grave problema nos anos de fortes ataques e junto a locais habitados ou frequentados pelas populações.

O ciclo de vida da processionária é variável, dependendo da localização dos ataques. No entanto, de um modo geral, pode dizer-se que as borboletas (imagos) emergem ao crepúsculo, nos meses de junho a setembro, sendo preferencialmente atraídas pelas silhuetas dos pinheiros e concentrando as posturas nas árvores de bordadura ou naquelas que se encontram isoladas. As lagartas manifestam a sua presença de setembro a março, época em que em termos de saúde pública se tornam marcantes, podendo ser observados ninhos sedosos na copa das árvores. No final deste período, descem para o solo, onde se enterram para pupar e voltar a emergir de junho a setembro.

Normas de intervenção ativa

- Plantação de outras espécies nas bordaduras dos povoamentos de pinheiros;
- Preferência por plantações mistas de espécies suscetíveis e não suscetíveis;
- Monitorização do fenómeno;

- Utilização de ações preventivas em povoamentos, com recurso à utilização de armadilhas iscadas com feromonas;
- Utilização de meios de luta biológicos e biotécnicos;
- Utilização de métodos mecânicos.

Restrições

- Evitar desbastes intensivos em povoamentos jovens de *Pinus* sp. E de *Cedrus* sp.;
- Não utilizar espécies suscetíveis em zonas urbanas ou em locais de concentração urbana;
- Não utilizar espécies suscetíveis nas bordaduras dos povoamentos;
- Não utilizar espécies suscetíveis nas bordaduras das vias de comunicação;
- Evitar a utilização de pinheiros isolados ou povoamentos pouco densos.

Normas específicas para os escolitídeos

Os escolitídeos constituem um dos grupos de insetos mais nocivos para as essências florestais e especialmente para as resinosas, sendo um dos principais agentes causadores de problemas fitossanitários e, em casos extremos, pela morte de grande número de árvores. Para além de causarem danos físicos às árvores, são também vetores de fungos, muitos dos quais patogénicos e agentes responsáveis pelo aparecimento de doenças. As árvores que se encontram em situação de *stress*, nas quais se incluem as árvores, total ou parcialmente queimadas e as árvores afogueadas, bem como, árvores recentemente cortadas e toros armazenados em estaleiro, são muito atrativas para os insetos pertencentes a esta família, que têm normalmente várias gerações por ano. Por outro lado, em casos extremos estes insetos podem também atacar árvores que se encontram em boas condições vegetativas, quando as populações se tornam demasiado elevadas.

Normas de intervenção ativa

- Utilização de ações preventivas em povoamentos, com recurso à utilização de armadilhas iscadas com feromonas, ou à utilização de árvores armadilha;
- Utilização de povoamentos mistos;
- Corte dos povoamentos antes de estes atingirem a caducidade;
- Realização de ações de operações culturais necessárias à diminuição do risco de infestação;
- Manter os povoamentos em bom estado fitossanitário, realizando antecipadamente as operações silvícolas adequadas, quer no povoamento, que em árvores que se encontrem debilitadas.

Restrições

- Entre fins de abril e fins de outubro (período de atividade destas pragas) toda a madeira cortada deve ser retirada num prazo inferior a 15-20 dias (ou descascada se tiver de permanecer mais tempo dentro do povoamento o que é desaconselhável);
- No restante período (entre outubro e abril), as pilhas de madeira cortada devem ser inspecionadas periodicamente para detetar a presença de escolitídeos e determinar quais as espécies mais abundantes a fim de se poder fazer a previsão das áreas que irão ser mais atacadas e que por isso devem ser observadas com mais cuidado;
- Eliminar antes de abril todas as árvores derrubadas pelo vento ou por qualquer outra causa bem como as atingidas por raios;
- A remoção inclui a árvore com a copa, a qual constitui abrigo de algumas espécies e zona de atividade de outras. Estas árvores são também úteis para a prospeção e tal como (2) podem servir para a previsão de pragas;
- Nas zonas de incêndio, devem extrair-se as árvores queimadas e as árvores “afogueadas”, estas últimas numa faixa de 20 a 50 m conforme a violência do incêndio; estas são árvores de grande risco de ataque. Estas parcelas devem ser mantidas em observação pois são mais frequentes os ataques de escolitídeos, sobretudo da hilésina;
- De futuro, deverá encarar-se a possibilidade de reconverter os atuais povoamentos estremes e equiénios em povoamentos em jardinado ou em povoamentos mistos de resinosas e folhosas. Estes tipos de exploração diminuem os ataques de escolitídeos;
- Sendo previsível a utilização do fogo controlado como meio de prevenção e luta contra os incêndios florestais e também para maneio do sub-bosque, com vista às explorações de floresta no seu uso múltiplo, indicam-se algumas normas provisórias a observar tendentes à diminuição do risco de incidência destas pragas. Assim recomenda-se não fazer fogo controlado:
- Nas parcelas em que as prospeções revelam níveis epidémicos de escolitídeos;
- Durante o período de voo dos escolitídeos, com especial atenção para a hilésina, a partir de fevereiro;
- Nas periferias dos incêndios, numa faixa de 20 a 50 metros;
- Quando a árvore entra em atividade;
- Em povoamentos muito jovens ou próximos do termo de explorabilidade.

Normas específicas para o Plátipo (*Platypus cylindrus*)

O Plátipo (*Platypus cylindrus*) é um inseto coleóptero decompositor de madeira morta ou de árvores em adiantada fase de degradação. Ataca diversas espécies de folhosas nomeadamente, carvalhos, castanheiros, eucaliptos e sobreiros, perfurando o tronco da árvore até ao lenho e sobre o qual escavam galerias, não para se alimentar, mas para aí cultivar os fungos dos quais as larvas se vão alimentar Os danos causados por este inseto nas árvores são, num 1.º nível, o de reduzir significativamente a qualidade da madeira produzida e num 2º nível, provocarem a morte das árvores o que dependendo do seu vigor ocorre entre 3 a 18 meses. No caso do sobreiro o maior risco de ataque deste inseto ocorre nos dois anos após o descortiçamento. Sendo capaz de perfurar a cortiça e construir as galerias os ataques destes insetos incidem em árvores debilitadas ou em *stress* e constitui, um fator de risco acrescido para os montados.

Normas de intervenção ativa

- Utilizar ações preventivas em povoamentos, com recurso à utilização de armadilhas iscadas com etanol;
- Manter boas condições sanitárias nos procedimentos de exploração:
- Proceder a técnicas de descortiçamento correto;
- Proceder a técnicas de poda corretas;
- Proceder a fertilizações do solo.

Restrições

- Remover de imediato as árvores atacadas do povoamento, antes do período de emergência dos insetos.

Normas específicas para a doença da tinta do castanheiro (*Phytophthora cambivora*)

A doença da tinta e doença da tinta do castanheiro *Phytophthora cinnamomi* e *Phytophthora cambivora* são fungos patogénicos do solo que atacam as raízes de várias espécies de carvalhos, incluindo a azinheira e sobreiro, castanheiros, nogueiras e amendoeiras. A disseminação destas doenças é feita através da água, solo e plantas contaminadas. As árvores atacadas apresentam sintomas de declínio cujo grau depende do estado de vigor das mesmas e da própria espécie. O castanheiro e as plântulas são as mais suscetíveis pelo que o ataque destes fungos pode conduzir à sua morte. Os carvalhos encontram-se entre as espécies mais resistentes, manifestando-se o ataque destes fungos por alterações no tronco com depreciação do seu valor comercial. Em condições favoráveis à doença ou em situações de *stress* ambiental podem mostrar sintomas de declínio (enfraquecimento das extremidades dos ramos e folhas pequenas amareladas).

Normas de intervenção ativa

- Aplicações do produto sistémico fosetilalumínio (ao solo ou em pulverização à parte aérea)
- Utilizar plantas sãs nos repovoamentos.
- Instalação em solos bem drenados.
- Não movimentar solos contaminados.
- Manter boas condições sanitárias nos procedimentos de exploração:
- Proceder a técnicas de descortiçamento correto;
- Proceder a técnicas de poda corretas;
- Proceder a fertilizações do solo.

Restrições

- Remover de imediato as árvores atacadas do povoamento.

Normas genéricas para a proteção contra agentes bióticos no montado de sobro

De modo geral são vários os fatores que concorrem para o mau estado fitossanitário do montado de sobro: a decrepitude, as más práticas culturais (ou a ausência delas) e de extração de cortiça ou ainda a má adaptação da espécie à estação. A maior parte das medidas a tomar são, portanto, de carácter preventivo.

As boas práticas de gestão do montado são essenciais para o estado fitossanitário do montado. Devem ser promovidas as práticas que promovam a fertilidade do solo e o vigor vegetativo das árvores.

As populações de insetos desfolhadores devem ser monitorizadas. Os ataques fortes de desfolhadores provocam a diminuição das produções de cortiça para além de debilitarem as árvores, tornando-as mais suscetíveis ao ataque de outras pragas. Em caso de ataque forte de desfolhadores podem ser utilizados inseticidas seletivos (antiquininicos).

Deve-se manter boas condições sanitárias nos procedimentos de exploração procedendo a descortiçamentos corretos (evitando feridas e excessos).

Como medida de prevenção da cobrilha da cortiça deve fazer-se uso de práticas silvícolas adequadas, favorecendo o vigor da árvore e desenvolvimento da copa.

ANEXO IV

Normas genéricas para a proteção contra agentes abióticos no Montado de Sobro e Azinho

- A regeneração natural deve ser a forma privilegiada de regeneração do montado, caso exista em densidade e qualidade suficiente. A realização de arborizações e adensamentos, quando se justifiquem, deverão salvaguardar a regeneração natural existente.
- A preparação do terreno não deve provocar danos nos sistemas radiculares dos sobreiros já existentes, devendo ser preservada a zona de projeção das copas das árvores não efetuando aí mobilizações de solo.
- O subcoberto deve ser gerido de modo a controlar o risco de incêndio, mas há que adotar práticas que preservem a zona de projeção das copas e o sistema radicular das árvores, bem como a regeneração natural existente. Os meios mecânicos que envolvam mobilização do solo (gradagens), quando utilizados no controlo da vegetação espontânea não devem atingir o sistema radicular das árvores.
- Em declives superiores a 10%, deve ser mantida parte da vegetação, caso se recorram a gradagens, devendo ser utilizados preferencialmente meios que não envolvam a mobilização do solo (corta matos ou motorroçadoras).
- A realização de podas de formação deve ser cuidadosa, fazendo cortes tangenciais e “limpos”, deixando uma superfície lisa e evitando feridas (esgaçamento). Não devem ser cortados ramos muito grossos, com mais de 3 – 4 cm de diâmetro, de modo a não provocar feridas extensas. Os ramos mortos constituem obviamente exceção.
- Recomenda-se a realização de pelo menos uma poda de formação antes da desbóia, de modo a obter um fuste direito e limpo de ramos com pelo menos 3 metros. Os instrumentos utilizados na poda devem ser desinfetados, sempre que se constate o ataque por parte de fungos no povoamento.
- Devem ser escolhidas para sair em desbaste as árvores pior conformadas, as que produzam cortiça de pior qualidade e as que se encontrem debilitadas pelo ataque de fatores bióticos ou abióticos.
- O descortiçamento deve ser feito corretamente cumprindo as exigências legais, nomeadamente quanto à altura de descortiçamento e ao diâmetro mínimo da árvore.
- Não se deve descortiçar nos dias chuvosos ou de vento quente e seco.
- As feridas no entrecasco devem ser evitadas, pelo que se recomenda não descortiçar árvores com cortiça com calibre inferior a 18 mm. Devem ser utilizadas ferramentas de descortiçamento apropriadas (machados corticeiros) ou ainda meios de descortiçamento mecânicas ou elétricos desenvolvidos especificamente para a extração da cortiça).
- Os machados que tenham sido utilizados em árvores doentes, nomeadamente com carvão do entrecasco ou outros fungos patogénicos, devem ser desinfetados antes de nova utilização, com produtos.
- Deve evitar-se o contacto das ferramentas utilizadas no descortiçamento com o solo.

- O descortiçamento deve ser sempre executado por operadores com formação adequada e, quanto possível, especializada, de forma a evitar feridas nos sobreiros que prejudiquem tanto a sanidade da árvore como as extrações futuras.
- O descortiçamento deve efetuar-se durante o período de atividade do câmbio suberofelodérmico da árvore, que geralmente ocorre entre os meses de Maio e Julho, podendo encurtar-se ou prolongar-se conforme as condições climatéricas do ano, a latitude, a exposição, a maior ou menor humidade do solo e outros fatores ecológicos com reflexos na atividade fisiológica das árvores.
- A poda dos sobreiros deve ser encarada e planeada como uma operação cultural realizada na perspetiva da sobrevivência das árvores e do seu rendimento em cortiça, não na perspetiva de obtenção de outros rendimentos do montado, secundários em termos económicos. A operação pode ser delineada de acordo com duas funções distintas:
    - poda de formação, destinada a conduzir as árvores novas a uma forma conveniente para a extração de cortiça;
    - podas de conformação, de frutificação e de manutenção, para garantia do equilíbrio de forma de árvores adultas, eliminando ramos mortos, doentes, quebrados, ou mal orientados (manutenção da copa), de forma a desafogar a copa, favorecer a frutificação e a facilitar a obtenção de pranchas de cortiça (conformação), em qualquer caso limitada à eliminação de até 25% do volume da copa, como valor de referência.
- A densidade dos povoamentos deve ser menor do que num povoamento para produção de material lenhoso, uma vez que o tamanho da copa e a sua exposição à luz solar direta devem ser otimizados em função da produção unitária de frutos. Para tal, devem utilizar-se compassos de instalação maiores, quando definitivos, ou remover uma maior percentagem de árvores nos desbastes que precedem a idade produtiva da espécie.
- Em qualquer caso e a despeito destas recomendações de carácter geral, deve ser sempre respeitada a legislação que regulamenta a realização de podas nos montados de sobro e azinho.

Restrições

- De acordo com a legislação em vigor, a extração da cortiça deve ser realizada a pau batido, estando a extração a meças proibida a partir de 2030.
- A atividade extrativa deve ser imediatamente suspensa, na árvore ou em todo o povoamento, em função da análise de cada situação concreta, sempre que, ao fazer-se a extração, se detete a presença de câmbio súbero-felodérmico aderente à prancha de cortiça. A retoma da

extração pode efetuar-se apenas quando se poder garantir uma boa separação entre a prancha extraída e aquele câmbio.

- Em condições de previsão climática apontando para eventos extremos de precipitação ou de seca, deve ser sempre ponderado o adiamento das operações de descortiçamento, a fim de garantir que não sejam causados danos irreversíveis no câmbio.
- Nos montados de sobro e azinho só são permitidas as mobilizações do solo que não afetem as raízes das árvores ou a regeneração natural.
- São imperativamente de evitar as decapitações de árvores, o corte de ramos de grande diâmetro e o esgaçamento de cortes, devendo todas as operações de poda ser executadas com cortes lisos e inclinados, perto da zona de inserção do ramo podado, mas respeitando a coroa de tecidos responsáveis pela cicatrização dos cortes.
- Não utilizar grades pesadas nas gradagens de modo a não afetar as raízes nem a regeneração natural.
- Não efetuar mobilizações do solo que não sejam estritamente necessárias.
- No caso de serem indispensáveis desmatações, privilegiar para a sua execução o recurso a roçadoras, ponderando sempre a possibilidade de proceder apenas a eliminações seletivas da vegetação sob coberto.
- Só recorrer a gradagens quando o declive é reduzido.
- Desinfetar com produtos adequados os equipamentos e materiais usados em povoamentos em mau estado sanitário.

ANEXO V

Normas de gestão ativa e restrições na restauração de galerias ripícolas

Normas de gestão ativa e restrições na restauração de galerias ripícolas

Devem ser arborizadas as margens dos cursos de água, nos troços da rede hidrográfica que para tal apresentem características morfológicas adequadas, pois isso favorece a regularização dos caudais, contribuindo para a estabilização das margens e diminuição da erosão. Por outro lado, as espécies ripícolas instaladas contribuem para uma zona de descontinuidade, dificultando a progressão de fogos, devido à baixa inflamabilidade que estas mesmas espécies geralmente apresentam. A vegetação lenhosa ribeirinha é ainda um elemento estruturante das comunidades lóticas contribuindo para a sua produtividade através da queda de órgãos vegetais, constitui o refúgio de um conjunto de espécies animais e vegetais, sendo, portanto, um fator de diversidade biológica ao nível das espécies, mas também ao nível das comunidades, favorecendo a diversidade biológica à escala regional e permitindo ainda uma valorização cénica da paisagem.

As galerias ripícolas podem integrar-se de forma harmoniosa num coberto florestal envolvente onde se apliquem sistemas de produção florestal menos elaborados tecnicamente; as vantagens dessa articulação enquadram-se na diversidade da produção florestal, na defesa da biodiversidade e na qualidade cénica da paisagem rural. A produção é de madeira de qualidade, a partir de espécies autóctones, com revoluções de longa duração que permitam a obtenção de peças de grande dimensão.

A erosão hídrica é de todas as formas de erosão existentes, aquela que assume um maior relevo, principalmente quando encaramos a ocupação da terra pelo Homem que, através de determinadas práticas (p.e. mobilização da terra, desflorestação, sobrepastoreio, irrigação), altera o equilíbrio existente entre a erosão natural e a pedogénese (formação do solo). A erosão tem várias consequências importantes ao nível da ecologia e economia humanas, pois pode provocar a remoção da camada produtiva de solos agrícolas, soterramento de solos férteis a jusante, danificar pontes, estradas e passeios, causar eutrofização e sedimentação nos cursos fluviais e albufeiras, levando muitas vezes ao assoreamento destes, que em situações mais extremas podem provocar inundações, e muitos outros prejuízos de degradações ambientais que apenas podem ser impedidos com muito esforço e custo económico.

- A largura da galeria ripícola vai depender essencialmente das características do relevo e da importância do curso de água.
- Na exploração de povoamentos adjacentes a galerias ribeirinhas, deixar árvores numa faixa junto àquelas galerias, de modo a que funcionem como zona tampão (*buffer*). Os objetivos são a não perturbação da zona com as operações de abate e evitar uma subida de temperatura devido a uma redução da sombra. Não é preciso serem grandes árvores.
- Para além das galerias ripícolas, as partes altas das bacias hidrográficas são de grande importância para assegurar a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos. Deve prever-se a sua adequada arborização com espécies, de preferência autóctones, que favoreçam a infiltração e subsequente absorção da água pelas raízes e evitem o escorrimento torrencial e erosivo.

- Nos vales e linhas de água o coberto florestal deve cumprir funções de defesa e valorização dos recursos hídricos e de proteção do solo contra a erosão além da normal função de produção. Este facto impõe a definição de estratos de arborização a tratar com sistemas de produção florestal específicos – uso preferencial de folhosas autóctones em composições mistas e estruturas irregulares – bem como a opção por técnicas cuidadas de instalação, condução e exploração dos povoamentos.
- A instalação dos povoamentos deve prever uma mobilização descontínua do solo, garantindo a manutenção do coberto vegetal natural, suficiente para a proteção contra a erosão, nos primeiros tempos após a instalação. Esta medida é particularmente importante, devido à natureza pouco coesa da maioria dos solos destes estratos de arborização, geralmente aluviais ou coluviais.
- Em alternativa à mobilização descontínua do solo, pode ponderar-se a instalação das plantas apenas com mobilização nas covas de plantação, designadamente quando estejam em causa cobertos preexistentes tidos por particularmente sensíveis à perturbação causada por outro tipo de mobilização.
- No planeamento das galerias ripícolas dos maiores cursos de água devem ser consideradas três zonas tampão, cuja dimensão é determinada pelo declive e pela permeabilidade do solo:
    - A Zona 1 ocupa a faixa de terra mais próxima da água e é composta por espécies florestais ribeirinhas. Tem como objetivo principal estabilizar a margem e providenciar habitat para os organismos aquáticos. As raízes das árvores desta faixa mantêm o solo íntegro, apesar da força erosiva da água, contribuindo ainda para a retenção de sedimentos.
    - A Zona 2 também é uma faixa florestal e situa-se imediatamente a seguir. A sua função principal é remover, transformar ou armazenar nutrientes, sedimentos e outros poluentes arrastados da bacia de alimentação por escorrimento superficial e subsuperficial.
    - A Zona 3 deve conter faixas de gramíneas, que desaceleram o escorrimento superficial, filtram os sedimentos e permitem a infiltração. Estas faixas de gramíneas protegem as áreas florestais e proporcionam a utilização do máximo de potencial do tampão florestal. Para que na zona 2 o armazenamento de sedimentos seja eficaz é necessário que o escoamento quando lá chega esteja em fluxo laminar. Deste modo, a zona 3 espalha o escoamento proveniente de áreas adjacentes e previne que este atinja a área tampão (zonas 1 e 2) de modo erosivo.
- Na Zona 1 a vegetação dominante deve ser composta por várias espécies arbóreas e arbustivas ripícolas, de preferência da flora autóctone. Deve ser constituída por uma mistura de espécies que proporcione queda prolongada e estável de folhagem, de forma a suprir as necessidades energéticas dos organismos aquáticos que delas se alimentam.

- Quando esta zona atinge uma determinada idade, começa a produzir resíduos de grande tamanho e estáveis que devem ser mantidos para aumentar a diversidade de habitats para a fauna aquática e que utiliza a margem, sem prejuízo de se aplicarem medidas de gestão do leito que controlem a sua excessiva acumulação ou inadequada distribuição.
- A existência de grandes árvores adultas deve ser favorecida até ao ponto de se abdicar da exploração económica de grandes exemplares situados sobre a margem e na proximidade imediata do plano de água.
- Na Zona 2 devem estar localizadas espécies arbóreas e arbustivas adequadas para a estação.
- A gestão deve permitir que haja variação dentro da classe de idade e tamanho nos vários tipos de vegetação sob coberto, de modo a haver vários estratos.
- É também uma zona que deve ser pouco perturbada. As intervenções que nela ocorrem devem incluir desbastes seletivos, de forma a manter o vigor do crescimento. Estas intervenções destinam-se a manter as boas condições de filtragem e uma densidade que permita proteger e potenciar a regeneração natural.
- A conciliação com a fauna bravia e o gado não é incompatível com os objetivos desta zona, desde que o nível de sombra e a produção de folhagem e de detritos sejam mantidos. Neste caso, o acesso do gado à água deve ser feito apenas em pontos de abeberamento previamente delimitados e preparados para o efeito.
- Na Zona 3, a vegetação deve ser constituída por herbáceas perenes e deve ser mantida vigorosa através do corte ou do consumo por herbívoros.
- Pode ser necessário restaurar periodicamente esta zona, com uma gradagem e remoção do material acumulado, para que este *buffer* mantenha o seu potencial de filtragem e retenção.
- A vegetação deve ser cortada periodicamente e os restos removidos. Periodicamente deve ser inspecionada e devem ser tomadas medidas para manter a sua densidade e resolver problemas de acumulação de nutrientes.
- É compatível com o pastoreio, pelo que se pode considerar a sua realização controlada.
- Estas três zonas devem ser inspecionadas anualmente, bem como imediatamente a seguir a tempestades, para detetar casos de depósito de sedimentos, de erosão ou de escoamentos para fora do leito. Medidas imediatas devem ser tomadas para parar a erosão e para recuperar o fluxo de água.
- A perturbação das Zonas 1 e 2 deve ser reduzida ao mínimo necessário, cingindo-se a exploração económica à remoção de árvores individuais de grande valor comercial e privilegiando-se nas intervenções culturais a remoção de árvores que apresentem problemas de configuração que prejudiquem as suas funções.

- Em geral, optar por sistemas de produção florestal baseados em povoamentos mistos e irregulares por manchas ou por pés de árvores, de revoluções de longa duração, prevendo ainda a manutenção de algumas árvores não sujeitas a abate para exploração económica, eventualmente gerindo em simultâneo um sub-bosque arbustivo diversificado.
- A intervenção produtiva tem de tomar especial atenção às espécies e exemplares com maior valor económico, por exemplo através de cuidadosas desramações, mas também ao controlo da composição do povoamento, através do assentamento de desbastes de regulação de composição, bem como à manutenção da estrutura irregular, mais favorável às funções esperadas de prestação de serviços.
- O sistema de produção florestal adotado deve ter em conta a necessidade de provocar o mínimo de perturbações possível, tanto na instalação, como posteriormente na intervenção cultural e na exploração; idealmente, pelo menos os alinhamentos mais próximos do curso de água não devem sequer ser economicamente explorados.
- Deve existir especial cuidado na execução dos desbastes e assentamento dos cortes de realização (quer por manchas, quer por pés de árvores), para que não seja danificado o povoamento remanescente.
- A remoção de árvores deve ser acompanhada da devida ponderação sobre as perturbações causadas no coberto vegetal e no solo.
- Do ponto de vista da proteção das margens, é importante que não haja intervalos na vegetação. Estes intervalos devem ser preenchidos com novas árvores ou corre-se o risco de desviar o curso da água.
- A altura do copado deve ser igual ou maior do que a largura da linha de água.
- Qualquer intervenção a realizar na banda ripícola deve ser efetuada, de preferência, no período que medeia entre Junho e Fevereiro, fora do período de reprodução das espécies faunísticas mais importantes existentes na área.
- Planear a instalação por módulos de composição mista, repetindo aleatoriamente módulos distintos entre si ao longo das margens.
- Quando haja ainda exemplares presentes de espécies autóctones, explorar a possibilidade de enraizamento no local de estacas das espécies com fácil propagação vegetativa, como os choupos e salgueiros, especialmente em ações de defesa dos taludes marginais.
- Explorar a possibilidade de instalação por sementeira direta de espécies com propagação fácil por essa via, como freixos e carvalhos.
- Minimizar a área de solo mobilizado.
- Reservar a instalação de material vegetal produzido em viveiro para as espécies mais difíceis de regenerar diretamente e para as que têm maior valor na produção florestal.

- Avaliar a ocorrência de focos de erosão e planear medidas de mitigação, nomeadamente através de obras de correção torrencial.
- Construir pequenas barragens em locais estratégicos para o amortecimento de cheias, aumentando simultaneamente as disponibilidades hídricas para rega, combate aos fogos e atenuação das faltas de água dos povoamentos florestais e comunidades vegetais espontâneos.
- Ordenar a vegetação nas margens dos cursos de água permanentes e temporários. As galerias resultantes, que devem ser mais ou menos contínuas, têm dois papéis a desempenhar: a) reduzir a velocidade do escoamento superficial e, consequentemente, permitir que muitas das partículas de solo que estão a ser arrastadas se venham a depositar nos vales e várzeas e b) reduzir a velocidade da água que escorre nos barrancos, ribeiras e rios evitando que haja erosão junto às margens. A composição, distribuição e densidade da vegetação lenhosa das margens, ao longo dos perfis longitudinal e transversal, são fatores determinantes da estabilidade e proteção das margens.
- Construir muretes nas pequenas depressões das encostas, contrariando a formação de sulcos e de ravinas.
- Plantar sebes ao longo das curvas de nível, nas parcelas de utilização do solo mais intensiva, com espécies dotadas de elevada capacidade para retenção de solos (sistema radicular superficial e desenvolvido e com base do caule muito ramificada).
- Ponderar a armação da superfície do terreno em terraços, se os declives forem superiores a 30% e for necessário colocar ou manter terrenos em produção, quer agropecuária, quer florestal intensiva, tendo em conta os custos elevados desta alternativa e os riscos potenciais de agravamento futuro de fenómenos erosivos, na eventualidade de não se poder garantir o uso e a manutenção adequados destas estruturas, designadamente quando da regeneração após exploração de sistemas florestais intensivos.
- Construir caminhos, valetas e aceiros com declive máximo de 10%. Para declives superiores recomenda-se que os caminhos sejam pavimentados com pedras ou asfalto. As valetas devem respeitar ainda mais os declives moderados, devem ser curtas e as descargas devem conduzir a água para locais onde não venham a provocar erosão ou excessivo encharcamento.
- Os terrenos que tenham importância para a conservação da água devem ser reflorestados; igualmente os terrenos expostos à erosão e a cheias, e ainda os impróprios para a agricultura e que, depois de arborizados, provem ter aptidão para a conservação da água e do solo.
- Proteger as plantações florestais que tenham interesse para a conservação da água e do solo e ter cuidado para que as condições se mantenham de modo a favorecer a função da floresta. Quanto mais vegetação está no local menor é a suscetibilidade a derrocadas.

- Fazer Seleção das espécies para florestas reguladoras da água, de modo a conseguir-se o máximo dispêndio de água nas bacias de receção que estão sobressaturadas, o que se consegue deixando povoamentos densos e escolhendo espécies de elevada transpiração, cujas copas intercetam grande quantidade de água.

Restrições

- Nas partes altas das bacias hidrográficas deve ser evitada a remoção da folhada e perturbação da vegetação pois podem por em causa a proteção contra a erosão.
- Em zonas de forte concentração e escoamento de águas pluviais e suscetível de riscos de erosão, deve definir-se uma distância mínima de 5 metros para cada um dos lados, onde só devem ser permitidas limpezas manuais e/ou com moto-roçadora do material vegetal que esteja a impedir, de algum modo, o escoamento, nunca promovendo a limpeza completa destas faixas. Quando a vegetação se torna muito densa pode prender outro material que é arrastado, funcionando como uma barreira que pode ter consequências graves nas margens e no leito. Deste modo, pode ser necessária a limpeza completa de alguns troços para garantir o escoamento. As intervenções florestais devem sempre preservar esta faixa.
- As vias de acesso necessárias para veículos e pessoas devem ser instaladas segundo percursos de baixo declive, oblíquos às linhas de água e preferencialmente sinuosos, para evitar a instalação de zonas de erosão.
- O acesso de pessoas e dos seus equipamentos de lazer devem ser condicionados e bem localizados, de modo a evitar o acesso através de zonas mais sensíveis.

ANEXO VI

Modelos de Silvicultura

PM 1 - Povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de lenho e fruto.

PB - Povoamento puro de Pinheiro bravo para produção de lenho.

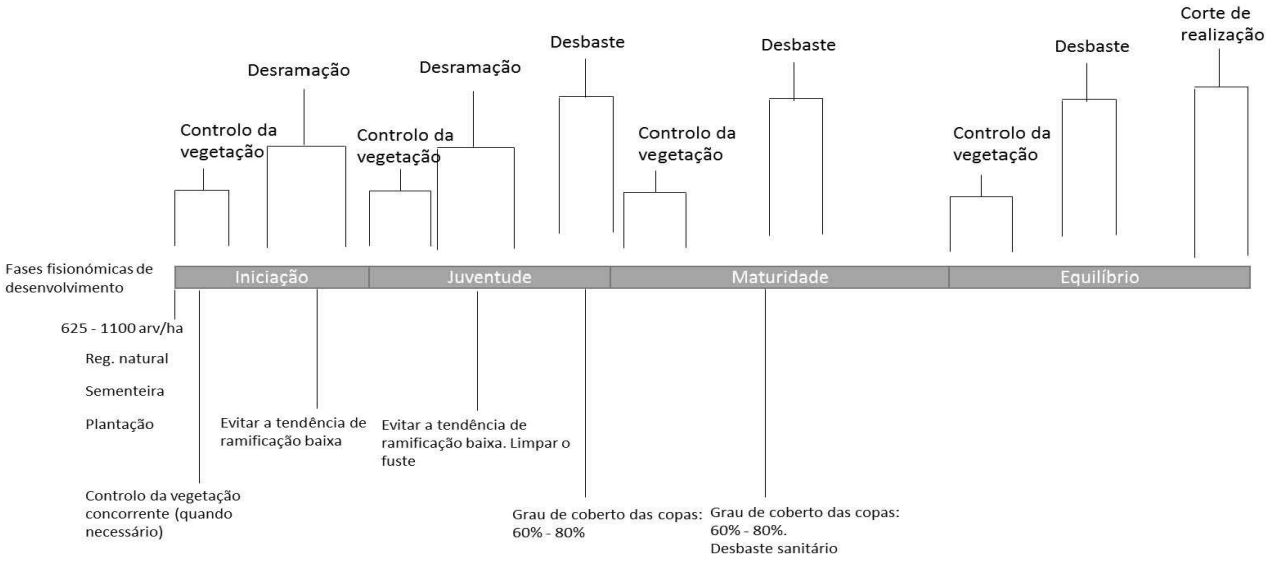
SB 1 - Povoamento puro de Sobreiro em sobreiral, para produção de cortiça.

RI – Povoamento misto de Ripícolas, para proteção.

PM1 - Povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de lenho e fruto.

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Instalação por:	
Regeneração natural	Em povoamentos já instalados, pode ser assegurada por assentamento de cortes sucessivos. É o método de instalação que pressupõe menores custos, e garante indivíduos mais adaptados às condições microestacionais. Contudo pode não ser suficiente para uma densidade aceitável, aconselhando-se nestes casos combinar com regeneração natural assistida com sementeira, para homogeneizar espacialmente a densidade. Deve usar-se como área disponível de referência 9 m^2 a 16 m^2.
Sementeira	A realizar entre outubro e novembro, às primeiras chuvas, em zonas de verão mais seco, ou até mais tarde em situações mais chuvosas. Não é viável quando existe o risco das sementes serem consumidas por animais. Densidade inicial entre 625 e 1100 árvores por ha.
Plantação	Permite a utilização de plantas melhoradas A realizar entre outubro e novembro, às primeiras chuvas, em zonas de verão mais seco, ou até mais tarde em situações mais chuvosas. Densidade inicial entre 625 e 1100 árvores por ha. Quanto mais baixa for a densidade de plantação maior deve ser a exigência com a qualidade das plantas a utilizar.
Controlo da vegetação	Tem como objetivo reduzir a concorrência pela luz, água e elementos minerais. Efetuar quando a vegetação espontânea entra em concorrência diretamente com as jovens plantas. Inicialmente controlar apenas em redor das mesmas, pelo efeito protetor da vegetação acompanhante. O controlo da vegetação deve ser realizado sem recurso à mobilização do solo.
Controlo de vegetação suplementar	Tem como objetivo reduzir o risco de incêndio. Realizar quando o estrato arbustivo entra em contacto com a parte inferior da copa. Efetuar mecânica ou manualmente nas entrelinhas.
Desramação	Realiza-se com o objetivo de melhorar a qualidade da madeira através do aumento da proporção de lenho limpo. A efetuar nas plantas com tendência para ramificar junto ao solo de modo a promover árvores com o fuste limpo e preferencialmente direito até 3 m. Não ultrapassar 1/3 da altura total da planta. Nas árvores em frutificação cortar os ramos inferiores, que não produzem flores femininas
Desbaste	Utilizar o desbaste pelo alto misto, com seleção de árvores de futuro de acordo com a sua distribuição espacial, produção de fruto e conformação da árvore (fuste alto e copa equilibrada). O grau de coberto das copas após desbaste deve ser 60 % a 80%, à exceção do primeiro desbaste devido à dimensão das árvores jovens (especialmente devido à aplicação das podas de formação propostas)

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Corte de realização	Corresponde ao termo de explorabilidade e à obtenção de receita do povoamento, dependente da qualidade da estação. Caso se pretenda a condução em estrutura irregular em coberto contínuo devem-se utilizar os cortes salteados. Caso se pretenda uma condução em estrutura regular devem-se utilizar cortes sucessivos uniformes.



Modelo de silvicultura para povoamento puro de Pinheiro manso, para produção de lenho e fruto.

Pinheiro bravo

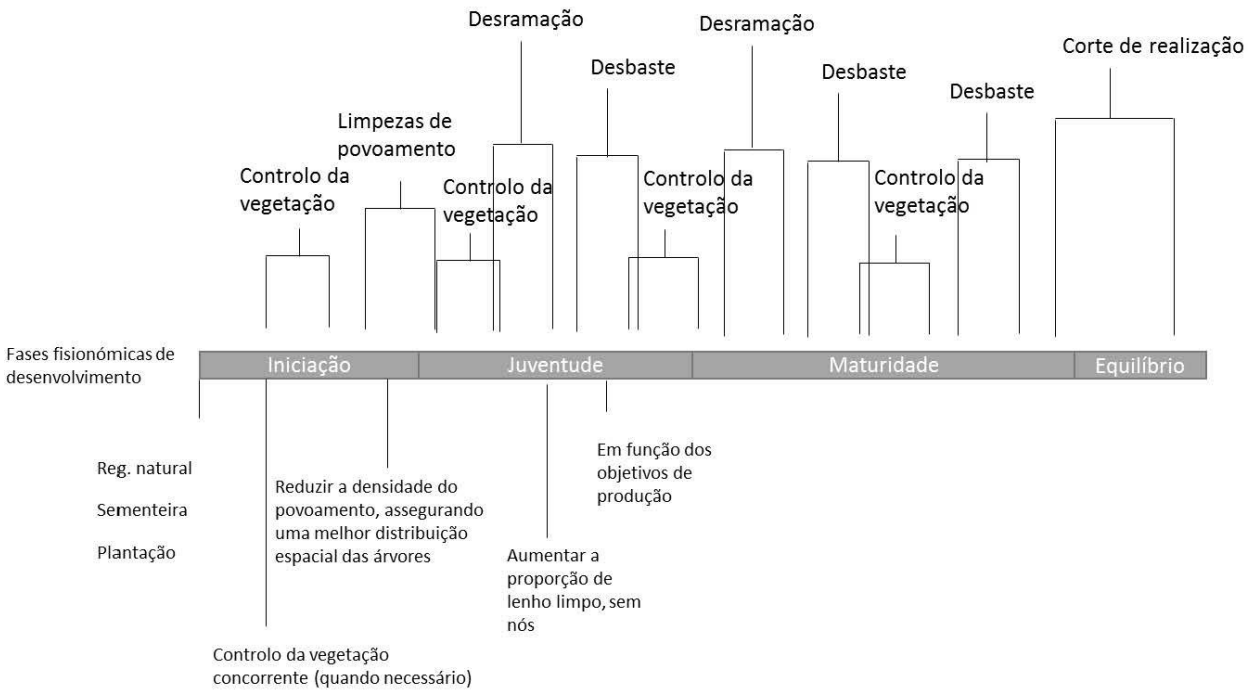
PB - Povoamento puro de Pinheiro bravo, para produção de lenho.

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Instalação por:	
Regeneração natural	Em povoamentos já instalados, é assegurada por assentamento de cortes sucessivos ou cortes rasos com sementões. É o método de instalação que pressupõe menores custos. Geralmente é abundante, contudo pode não ser suficiente para uma densidade aceitável, aconselhando-se nestes casos combinar com regeneração natural assistida com sementeira, para homogeneizar espacialmente a densidade. O sucesso depende das características da estação. De evitar quando os povoamentos responsáveis pela produção de sementes não apresentem as características genéticas mais desejadas para a reprodução.
Sementeira	Pode ser o método mais recomendado no caso de solos pobres e/ou com afloramentos rochosos.
Plantação	É aconselhável em solos não muito delgados ou que não estejam muito degradados. Dispensa a limpeza intraespecífica precoce. Permite a utilização de plantas selecionadas, ou mesmo melhoradas. É o método mais usado entre nós. Em linhas, entre outubro e novembro. Densidade inicial: entre 1300 e 1700 plantas por hectare. Quanto mais baixa for a densidade de plantação maior deve ser a exigência com a qualidade das plantas a utilizar.
Controlo da vegetação	Tem como objetivo reduzir a concorrência pela luz, água e elementos minerais. Efetuar quando a vegetação espontânea entra em concorrência diretamente com as jovens plantas. O controlo da vegetação deve ser realizado sem recurso à mobilização do solo.
Controlo de vegetação suplementar	Tem como objetivo reduzir o risco de incêndio. Realizar quando o estrato arbustivo entra em contacto com a parte inferior da copa. Realizar mecânica ou manualmente nas entrelinhas.
Limpeza de povoamento	Realizada com o objetivo de reduzir a densidade do povoamento, assegurando uma distribuição mais equilibrada das árvores.
Desbaste	De acordo com os objetivos do povoamento em relação à produção de lenho considera-se: Para produção de rolaria deve-se utilizar o desbaste sistemático ou desbaste pelo baixo. Para a produção de madeira de serração deve-se utilizar o desbaste pelo baixo ou desbaste pelo alto misto, com seleção das árvores de futuro (pelo menos o dobro da densidade final). Para a produção de madeira para folhear ou para uso em carpintaria ou marcenaria o desbaste pelo alto misto, com seleção das árvores de futuro (pelo menos o dobro da densidade final).

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Desramação	Tem como objetivo melhorar a qualidade da madeira, através do aumento da proporção de lenho limpo, sem nós. Desramação das árvores selecionadas previamente como árvores de futuro, feita até aos 3-4 m de altura. Realizar em 2 a 3 intervenções. Desramam-se árvores com DAP compreendido entre os 10 e os 15 cm. Não se devem cortar ramos com mais de 2 a 3 cm de diâmetro de base. Na segunda desramação faz-se apenas nas árvores de futuro.
Corte de realização	Corresponde ao termo de explorabilidade em função da qualidade da estação e objetivos de produção.

NOTA:

Em situações em que se pretenda a condução em estruturas irregulares – designadamente quando sejam importantes funções de proteção, conservação de habitats, fauna e flora, silvopastorícia, caça e pesca e/ou valorização da paisagem – recomenda-se a formação de estruturas irregulares por manchas, aplicando-se a cada uma o modelo acima descrito, consoante a sua fase de desenvolvimento.



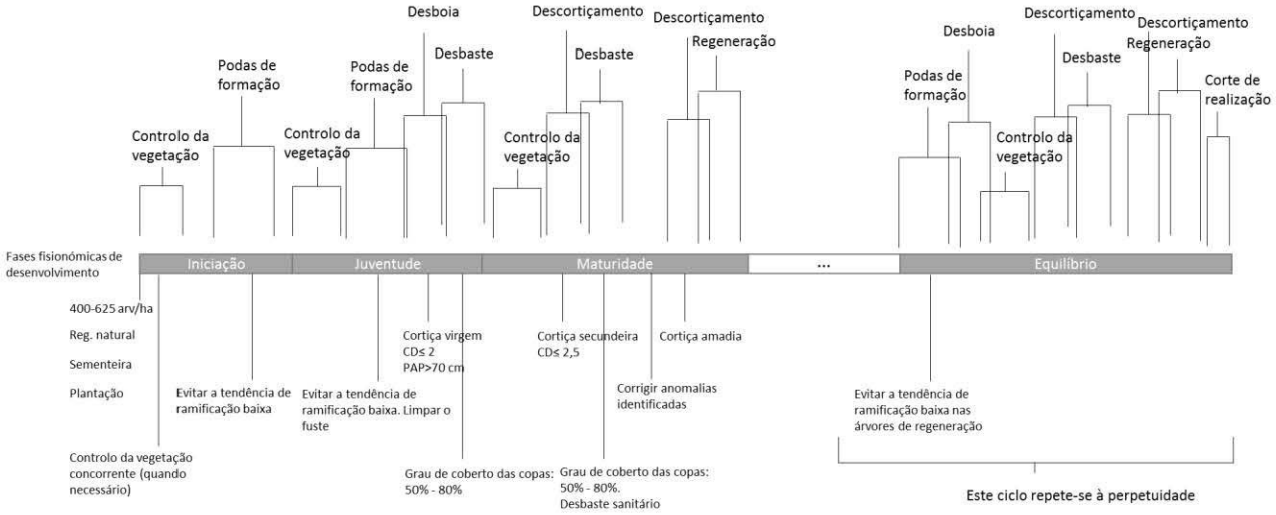
Modelo de silvicultura para povoamento puro de Pinheiro bravo, para produção de lenho.

SB1 - Povoamento puro de Sobreiro em sobreiral, para produção de cortiça.

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Instalação por:	
Regeneração natural	É o método de instalação que pressupõe menores custos, e garante indivíduos mais adaptados às condições microestacionais. Contudo pode não ser suficiente para uma densidade aceitável, aconselhando-se nestes casos combinar com regeneração natural assistida com sementeira, para homogeneizar espacialmente a densidade. Deve usar-se como área disponível de referência 16 m^2 a 25 m^2.
Sementeira	A realizar entre outubro e novembro, às primeiras chuvas, em zonas de verão mais seco, ou até mais tarde em situações mais chuvosas. Não é viável quando existe o risco das sementes serem consumidas por animais. Densidade inicial entre 400 e 625 árvores por ha.
Plantação	Permite a utilização de plantas melhoradas. A realizar entre outubro e novembro, às primeiras chuvas, em zonas de verão mais seco, ou até mais tarde em situações mais chuvosas. Densidade inicial entre 400 e 625 árvores por ha. Quanto mais baixa for a densidade de plantação maior deve ser a exigência com a qualidade das plantas a utilizar.
Controlo da vegetação	Tem como objetivo reduzir a concorrência pela luz, água e elementos minerais. Efetuar quando a vegetação espontânea entra em concorrência diretamente com as jovens plantas. Inicialmente controlar apenas em redor das mesmas, pelo efeito protetor da vegetação acompanhante. O controlo da vegetação deve ser realizado sem recurso à mobilização do solo.
Poda de formação	Na primeira intervenção deve ser dada prioridade, no sentido topo-base, à eliminação de forquilhas (caso existam), ramos com inserção aguda ou com forte tendência para engrossar, com diâmetro inferior a 4 cm seguida da eliminação dos ramos mais próximos do solo até 1/3 dos ramos vivos. Nas intervenções seguintes corrigir qualquer anomalia e acabar de desramar o fuste até à altura de no mínimo 3 metros.
Desbaste	Utilizar o desbaste pelo alto misto, com seleção de árvores de futuro de acordo com a sua distribuição espacial, qualidade da cortiça e conformação da árvore (fuste alto e copa equilibrada). O primeiro desbaste deve ser contemporâneo do 2º descortiçamento ou caso não seja possível, do primeiro (devido à necessidade de selecionar as árvores com a melhor qualidade de cortiça). O grau de coberto das copas após desbaste deve ser 50 % a 80%, à exceção do primeiro desbaste, devido à dimensão das árvores jovens (especialmente devido à aplicação das podas de formação propostas)
Desboia e descortiçamento	O PAP (perímetro do tronco a 1,3 m do solo) mínimo é de 70 cm e a altura máxima a descortiçar não pode exceder o dobro do PAP. Respeitar as alturas máximas de descortiçamento e a idade mínima de criação de cortiça fixadas pela legislação em vigor. O intervalo mínimo entre descortiçamentos é de 9 anos. Até à maturidade é aconselhável registar a qualidade da cortiça, na árvore, como auxiliar do planeamento do desbaste.

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Regeneração	Tem como objetivo a manutenção de grau de coberto contínuo e produção de cortiça constante de forma a manter a sustentabilidade económica e ecológica do sistema. Deve realizar-se quando na estrutura do povoamento deixarem de existir árvores na classe de PAP de 30 a 70 cm. O regime de regeneração deve ser definido otimizando o momento, intensidade de regeneração e distribuição espacial das árvores de acordo com os objetivos definidos para o povoamento. Deve-se usar como referência a área por árvore de regeneração entre 16-25 m^2.
Corte de realização	Corresponde ao termo de explorabilidade. De forma a promover uma estrutura irregular em coberto contínuo devem-se utilizar os cortes salteados.

NOTA: Pode haver situações em que seja possível o aproveitamento do lenho de árvores abatidas para peças de serração.



Modelo de silvicultura para povoamento puro de sobreiro em sobreiral, para produção de cortiça.

Pinheiro bravo

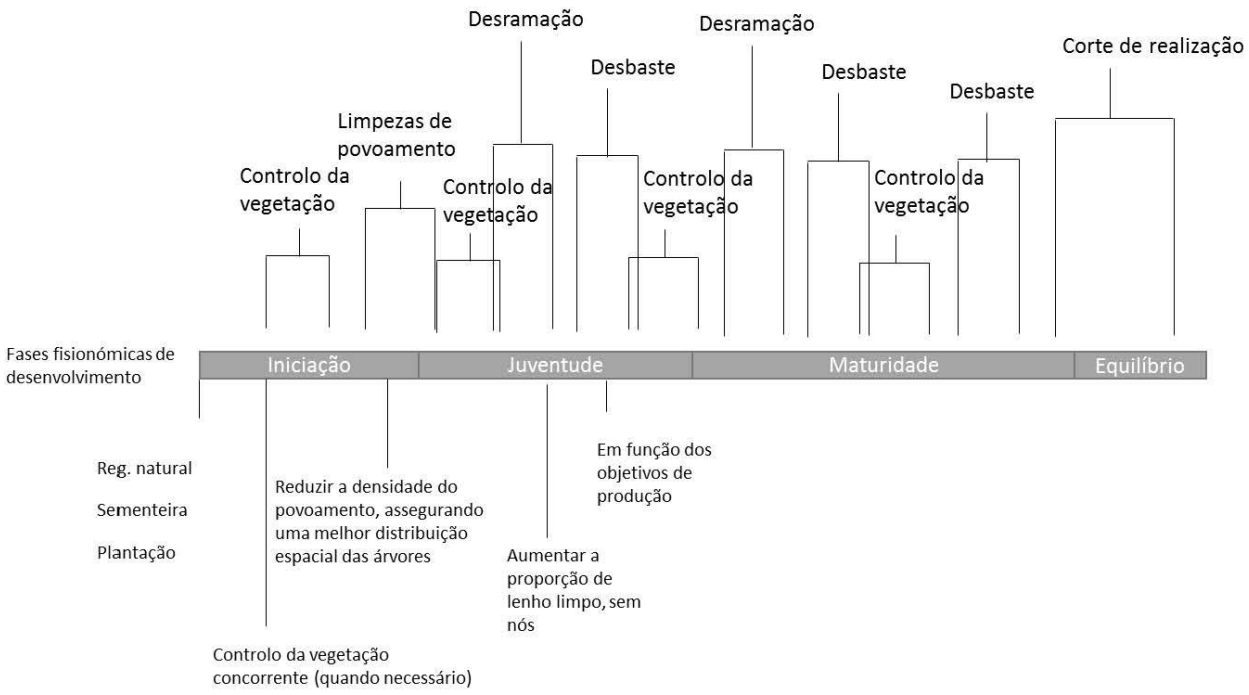
PB - Povoamento puro de Pinheiro bravo, para produção de lenho.

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Instalação por:	
Regeneração natural	Em povoamentos já instalados, é assegurada por assentamento de cortes sucessivos ou cortes rasos com sementões. É o método de instalação que pressupõe menores custos. Geralmente é abundante, contudo pode não ser suficiente para uma densidade aceitável, aconselhando-se nestes casos combinar com regeneração natural assistida com sementeira, para homogeneizar espacialmente a densidade. O sucesso depende das características da estação. De evitar quando os povoamentos responsáveis pela produção de sementes não apresentem as características genéticas mais desejadas para a reprodução.
Sementeira	Pode ser o método mais recomendado no caso de solos pobres e/ou com afloramentos rochosos.
Plantação	É aconselhável em solos não muito delgados ou que não estejam muito degradados. Dispensa a limpeza intraespecífica precoce. Permite a utilização de plantas selecionadas, ou mesmo melhoradas. É o método mais usado entre nós. Em linhas, entre outubro e novembro. Densidade inicial: entre 1300 e 1700 plantas por hectare. Quanto mais baixa for a densidade de plantação maior deve ser a exigência com a qualidade das plantas a utilizar.
Controlo da vegetação	Tem como objetivo reduzir a concorrência pela luz, água e elementos minerais. Efetuar quando a vegetação espontânea entra em concorrência diretamente com as jovens plantas. O controlo da vegetação deve ser realizado sem recurso à mobilização do solo.
Controlo de vegetação suplementar	Tem como objetivo reduzir o risco de incêndio. Realizar quando o estrato arbustivo entra em contacto com a parte inferior da copa. Realizar mecânica ou manualmente nas entrelinhas.
Limpeza de povoamento	Realizada com o objetivo de reduzir a densidade do povoamento, assegurando uma distribuição mais equilibrada das árvores.
Desbaste	De acordo com os objetivos do povoamento em relação à produção de lenho considera-se: Para produção de rolaria deve-se utilizar o desbaste sistemático ou desbaste pelo baixo. Para a produção de madeira de serração deve-se utilizar o desbaste pelo baixo ou desbaste pelo alto misto, com seleção das árvores de futuro (pelo menos o dobro da densidade final). Para a produção de madeira para folhear ou para uso em carpintaria ou marcenaria o desbaste pelo alto misto, com seleção das árvores de futuro (pelo menos o dobro da densidade final).

INTERVENÇÃO	DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO
Desramação	Tem como objetivo melhorar a qualidade da madeira, através do aumento da proporção de lenho limpo, sem nós. Desramação das árvores selecionadas previamente como árvores de futuro, feita até aos 3-4 m de altura. Realizar em 2 a 3 intervenções. Desramam-se árvores com DAP compreendido entre os 10 e os 15 cm. Não se devem cortar ramos com mais de 2 a 3 cm de diâmetro de base. Na segunda desramação faz-se apenas nas árvores de futuro.
Corte de realização	Corresponde ao termo de explorabilidade em função da qualidade da estação e objetivos de produção.

NOTA:

Em situações em que se pretenda a condução em estruturas irregulares – designadamente quando sejam importantes funções de proteção, conservação de habitats, fauna e flora, silvopastorícia, caça e pesca e/ou valorização da paisagem – recomenda-se a formação de estruturas irregulares por manchas, aplicando-se a cada uma o modelo acima descrito, consoante a sua fase de desenvolvimento.



Modelo de silvicultura para povoamento puro de Pinheiro bravo, para produção de lenho.

ANEXO VII

Manutenção e fomento de corredores ecológicos

Manutenção e fomento de corredores ecológicos – Normas de intervenção ativa e restrições

Os corredores ecológicos, definidos à escala regional no âmbito do PROF, correspondem a um conjunto de elementos da paisagem essenciais para a manutenção da estabilidade ecológica regional. É atualmente consensual que é necessária a definição de uma estrutural ecológica de modo a alcançar uma paisagem sustentável, no que diz respeito tanto aos recursos bióticos como abióticos (Ahern, 1995).

É ainda largamente admitido que o planeamento dos recursos á escala da paisagem é essencial para alcançar a sustentabilidade (Leitão *et* al., 2002).

O artigo 10 da diretiva habitats refere que caso se revele necessário os estados membro devem envidar esforços no sentido de incentivar a gestão de elementos paisagísticos de especial importância para a fauna e para a flora. Estes elementos, ainda segundo a diretiva, consistirão em elementos que pela sua estrutura linear e contínua (rios, ribeiras e respetivas margens) ou pelo seu papel de espaço de ligação, são essenciais á migração, à distribuição geográfica e ao intercâmbio genético de espécies selvagens.

Por seu lado a Estratégia Nacional de Conservação da Natureza e da Biodiversidade indica explicitamente os PROF como figuras de planeamento onde deve ser dada indicação sobre os corredores ecológicos.

A manutenção da diversidade genética pode enquadrar-se em situações em que existem populações dispersas com pouca ligação entre si, formando uma metapopulação. Nestas situações o intercâmbio genético pode ser um fator essencial para a manutenção da diversidade. A delimitação de corredores ecológicos de conexão pode, em alguns casos, favorecer aquele intercâmbio: por exemplo, em áreas de agricultura intensiva muito generalizada, a manutenção de faixas contínuas de arvoredo, compartimentando-as e enquadrando-as, pode estabelecer uma conexão eficiente entre áreas florestais envolventes. As áreas com potencial para corredor ecológico devem ser avaliadas individualmente, devendo a sua gestão ser planeada em função dos valores naturais que se pretendem conectar. Todavia, há medidas de carácter geral que devem ser tomadas e que visam manter a conectividade, tais como:

- A conservação de elementos invariantes e estruturantes da paisagem
- A proteção da qualidade da água
- A manutenção de uma coesão ecológica regional
- A conservação da conectividade da paisagem em particular entre áreas protegidas
- A manutenção de espaços que funcionem como barreira à propagação de incêndios florestais

A nível regional foram identificados os corredores ecológicos fundamentais, considerando os objetivos acima indicados, tendo em consideração:

- A rede hidrológica e zonas envolventes. Considera-se a rede hidrológica como a “espinha dorsal” da estrutura ecológica regional. Constitui um elemento invariante e estruturante de

qualquer paisagem. Constituem naturalmente corredores ecológicos, permitindo manter a conectividade ecológica.

- O estabelecimento de ligações entre as áreas protegidas da região.
- A vegetação ripícola tem um papel importante como filtro de sedimentos e materiais provenientes da erosão dos solos situados acima dos ecossistemas ripários. As galerias ripícolas devem ser conservadas, considerando para tal as normas relativas aos espaços florestais de proteção e/ou conservação correspondentes.
- A função principal dos espaços florestais existentes ou a criar nos corredores ecológicos será a proteção e/ou a conservação, considerando as normas respetivas

Normas de intervenção ativa

- Implementar a conservação e gestão ativa de corredores de migração da avifauna, contemplando particularmente a manutenção de redes regionais de refúgios para as aves.
- Manter a diversidade e a qualidade de habitats dentro de cada corredor.
- Manter/criar um mosaico de compartimentos de diferentes idades, oferecendo melhores condições de habitat para a fauna e flora.
- Proteger e manter as galerias ripícolas pouco intervencionadas.
- Nos corredores entre zonas húmidas, procurar manter um elevado nível da qualidade da água, da vegetação aquática e marginal, bem como ações que permitam manter em atividade os açudes, diques e outros pontos de água.
- Implementar medidas de recuperação dos núcleos de vegetação natural pertencentes ao corredor que tenham sido destruídos pelo fogo.
- Tomar as medidas necessárias para prevenir a ocorrência de incêndios que possa afetar esses núcleos nomeadamente, através do ordenamento preventivo das áreas florestais em redor.
- No caso dos corredores naturais, usados por aves em migração, torna-se essencial manter os bosquetes espontâneos nos barrancos.

Restrições

- Controlar a interposição de barreiras, em particular daquelas que apresentam grande desenvolvimento longitudinal (por exemplo estradas, urbanizações, agricultura intensiva).
- O assentamento de vias de comunicação em áreas com corredores ecológicos deve acautelar a continuidade e conectividade dos corredores.
- Controlar a instalação de novos povoamentos florestais no que respeita a localização, dimensão, composição, infraestruturas, e acompanhamento de ações futuras.
- Manter bem conservadas as estruturas naturais de conexão, com particular ênfase para as linhas de água e respetiva vegetação ripícola, manchas de mato e estrato herbáceo espontâneo. Em vales e linhas de água, a presença de solos mais frescos e mais férteis é favorável à utilização de espécies de folhosas ripícolas em compasso denso.

- A utilização de vedações na proteção da regeneração natural, por exemplo, constitui uma barreira à livre circulação dos animais e aos movimentos de dispersão; como tal, sempre que possível, devem-se utilizar proteções individuais nas plantas.

ANEXO VIII

Operações de manutenção/beneficiação na Rede Divisional/FGC

Sob a designação de gestão de combustíveis (também designada pela "escola francesa" por silvicultura preventiva) agrupa-se um conjunto de medidas aplicadas aos povoamentos florestais que visam dificultar a progressão do fogo e diminuir a sua intensidade, limitando os danos causados no arvoredo. Pretende-se, assim, garantir que os povoamentos possuam a máxima resistência à passagem do fogo e reduzir a dependência das forças de combate para a sua proteção.

A gestão de combustíveis atua ao nível de duas das características dos povoamentos:

A *estrutura,* que respeita à forma do seu arranjo interno, ligada à distribuição etária das árvores, à arquitetura das copas, à existência e distribuição de diferentes estratos do sub-bosque e aos horizontes do solo;

A *composição,* que respeita à variedade e natureza das espécies componentes dos povoamentos.

No primeiro caso procura-se gerar e manter descontinuidades verticais e horizontais entre os diferentes níveis de combustíveis, por exemplo eliminando o subcoberto arbustivo ou subindo a altura das copas.

No segundo, procura-se sobretudo criar povoamentos com espécies (ou misturas de espécies) menos inflamáveis e menos combustíveis ou que resistam melhor à passagem do fogo.

No que diz respeito à propagação do fogo, é importante salientar que a composição dos povoamentos desempenha um papel muito menos importante que a sua estrutura, facto que deve ser tido em consideração no processo de Seleção das espécies/modelos gerais de silvicultura.

Normas de intervenção ativa

- Todos os instrumentos de gestão florestal (PGF, plano ZIF, instrumentos de gestão territorial específicos de Sítios da Lista Nacional de Sítios/ZPE, POAP e outros planos especiais, projetos florestais) deverão explicitar medidas de gestão de combustíveis e a sua integração e compatibilização com os esquemas superiores de organização e proteção dos espaços florestais, designadamente o PROF e os PDF;
- Em cada unidade de gestão florestal (exploração agro-florestal ou ZIF) deverá ser estabelecido, no âmbito da instalação, dos tratamentos culturais, da gestão do sub-bosque, do corte e da regeneração dos povoamentos, um mosaico de povoamentos e, no seu interior, de parcelas, com diferentes idades, estruturas e composições, que garanta:
    - A descontinuidade horizontal e vertical dos combustíveis no interior dos maciços e a existência de ruturas no seu desenvolvimento territorial;
    - A alternância entre parcelas com diferente inflamabilidade e combustibilidade, aproveitando as diferentes estações
- A dimensão das parcelas deverá variar entre 20 a 50 ha, nos casos gerais, e entre 1 a 20 ha nas situações de maior perigo de incêndio (vertentes viradas a barlavento ou a sul/leste,

encostas com declives superiores a 45%, espécies inflamáveis e/ou pouco resistentes ao fogo, zonas com intensa utilização humana - parques de recreio, etc.) e o seu desenho e localização deverão ter em especial atenção o previsível comportamento do fogo;

- Deverá ser favorecida a constituição de povoamentos de folhosas caducifólias, de preferência conduzidas em compassos apertados, sempre que as condições edafo-climáticas garantam o sucesso das arborizações. A expansão destas espécies para estações marginais (e.g. com maior secura edáfica) tem efeitos contraproducentes, pois aumenta significativamente a sua inflamabilidade no Verão.

Restrições

- Os povoamentos florestais monoespecíficos e equiénios não poderão ter um desenvolvimento territorial contínuo superior a 50 ha, devendo ser compartimentados:
- Pela rede de faixas de gestão de combustível ou por outros usos do solo;
- Por linhas de água e respetivas faixas de proteção;
- Por faixas de alta densidade.
- A rede divisional visa essencialmente assegurar a compartimentação da floresta para efeitos de gestão e, secundariamente, a acessibilidade aos espaços florestais, apresentando também um importante papel no âmbito da defesa da floresta contra incêndios.
- O conhecimento dos ventos dominantes, do comportamento do fogo no passado e da dinâmica do coberto vegetal, são imprescindíveis à tomada de decisões sobre a densidade e tipo de rede divisional.
- As redes divisionais devem ser traçadas tendo em atenção a topografia do terreno, aproveitando as linhas de cumeada mais acentuadas, como locais que induzem uma alteração das características de progressão dos fogos, para a construção de aceiros.
- Os arrifes não devem coincidir com a linha de maior declive, pois o comportamento dos incêndios altera-se, aumentando fortemente a velocidade de progressão das chamas, mecanismo designado por "efeito de chaminé", o que poderá ter graves consequências na dimensão do incêndio.
- Sempre que possível, os arrifes serão utilizados como caminhos florestais, devendo as faixas adjacentes ter uma densidade de coberto inferior à do povoamento, ou ser arborizadas com espécies diferentes, quebrando assim as manchas contínuas.
- A densidade recomendada da rede divisional varia em função das condições topográficas e da vegetação herbácea e arbustiva, situando-se, para a situação portuguesa, em média entre os 30 e os 40 m por hectare.

- Os aceiros sem vegetação (corta-fogo) devem ter uma largura igual a 2-8 vezes a altura dominante do povoamento. A largura a utilizar deverá ser tanto maior quanto maior for o declive do terreno. Caso a instalação seja feita ao longo de estradas ou caminhos florestais, a maior largura da faixa deverá estar localizada no lado de onde sopram os ventos dominantes durante o Verão. Em encostas, a maior largura da faixa deverá estar localizada a jusante.

Faixas de Gestão de Combustível

Estas são parcelas de território onde se garante a remoção total ou parcial de biomassa florestal, através da afetação a usos não florestais (agricultura, infraestruturas, etc.) ou a técnicas silvícolas (desbastes, limpezas, fogo controlado, etc.), com o objetivo principal de reduzir o perigo de incêndio. Subdividem-se em Faixas de Redução de Combustível e Faixas de interrupção de Combustível.

As suas funções são:

- A diminuição da superfície percorrida por grandes incêndios;
- Reduzir os efeitos da passagem de grandes incêndios;
- Isolamento de focos potenciais de ignição de incêndios.

As suas especificações técnicas (de aceitação mais generalizada) são:

- Largura entre 100 e 125 m e localização em linhas onde o combate indireto esteja facilitado (cumeadas, estradas e ao longo dos vales);
- Os compartimentos criados devem situar-se entre os 300-500 e os 5.000 ha, dependendo do tipo de paisagem e sistema florestal;
- O coberto arbóreo não deve ser superior a 50% e idealmente deve situar-se entre os 20-30%;
- A base da copa não deve baixar dos 3 metros.

Mosaico de parcelas de Gestão de Combustível

Consistem em parcelas limitadas pela Rede de Faixas de Gestão de Combustível, onde será feita uma gestão dos vários estratos de combustível, através da diversificação da estrutura e composição dos povoamentos e da ocupação do solo.

Será realizada uma análise cuidada de operações silvícolas e de projetos de arborização e de outros investimentos, previstos para estas áreas, com vista à manutenção de faixas de descontinuidade de combustível no interior da rede primária de Faixas de Gestão de Combustível (ex. integração de zonas agrícolas, etc.).

Zonas de Proteção a Prédios Urbanos

- 50 metros – Habitações, armazéns e instalações de animais (pocilgas, palheiros, etc);
- 100 metros – Aglomerados, parques e polígonos industriais.

Gestão

É assegurada por organizações de produtores florestais, que devem dispor de capacidade adequada e estar dotadas de um centro de custos específico para o efeito.

ANEXO IX

Operações de manutenção/beneficiação na Rede Viária

Infraestruturas florestais

De entre as infraestruturas mais importantes para o ordenamento, gestão e proteção da floresta é de realçar a extrema importância das redes viária e divisional e dos pontos de água. As redes viária e divisional são componentes essenciais na organização espacial das áreas florestais ordenadas e a beneficiar, sendo também dois subsistemas infraestruturais que se interligam e complementam. No planeamento do seu traçado uma das preocupações é sem dúvida a necessidade de aumentar a acessibilidade das áreas florestais, tanto para a instalação como para a condução dos povoamentos e a exploração florestal. O delineamento destas redes deve considerar vários fatores económicos, dos quais se destacam o valor da expectativa do material lenhoso a extrair e os encargos da extração, bem como valores ecológicos a preservar.

Rede viária florestal

A rede viária florestal cumpre um leque de funções variado, que inclui a circulação para o aproveitamento dos recursos naturais, para a constituição, condução e exploração dos povoamentos florestais e das pastagens e, ainda, para o passeio e fruição da paisagem. A rede viária florestal assume também, por vezes, uma importância fundamental para o acesso a habitações, aglomerados urbanos e equipamentos sociais integrados ou limítrofes aos espaços florestais.

No contexto exclusivo da DFCI uma rede viária desempenha as seguintes funções:

Permite um rápido deslocamento dos meios de combate, não só à zona de fogo mas também aos pontos de reabastecimento em água, combustível, etc.

Integra a rede de faixas de gestão de combustíveis (ver DFCI21), sendo fundamental para a eficácia da rede primária, onde as equipas de luta encontram condições favoráveis para o combate ao fogo, em segurança;

Permite a circulação de patrulhas de vigilância móvel terrestre, em complemento com a rede de vigilância fixa.

A rede viária florestal é constituída por:

- caminhos florestais, que dão passagem durante todo o ano a todo o tipo de veículos;
- estradões, em que a circulação sem restrições durante o ano é limitada aos veículos todo-o-terreno, desempenhando uma função primordial de servir às operações e compartimentação florestais; trilhos, que são vias de existência efémera, destinadas à passagem exclusiva de tratores e máquinas florestais.

O planeamento, construção e manutenção da rede viária florestal obedece a um vasto conjunto de especificações e normas, pelo fortíssimo impacte que tem no meio ambiente, na produtividade e na proteção dos espaços florestais. O rigor na sua definição impõe-se ainda pelos elevados custos de

construção e, sobretudo, de manutenção que a ela estão normalmente associados. Assim é importante respeitar um conjunto de normativos dos quais se destacam os enumerados de seguida.

Normas para a construção da rede viária florestal

- A largura mínima da faixa de rodagem deverá ser de 4 m, tendo em consideração o tipo de veículos que utilizam estes caminhos, quer sejam afetos à exploração quer aos corpos de bombeiros.
- Os caminhos de acesso deverão ser projetados de forma a permitirem uma fácil e rápida manutenção dos veículos de combate a incêndios com carga plena de água.
- Os caminhos de acesso não deverão constituir "armadilhas" para as viaturas, devendo estar ligados em ambas as extremidades a uma via de circulação principal, isto é, devem-se evitar os "becos sem saída".
- Quando não for possível a opção anterior, como alternativa e para caminhos com menos de 1000 m de extensão, podem conceber-se plataformas de viragem ou de inversão de marcha, estrategicamente colocadas, devendo encontrar-se devidamente sinalizadas. Nestes caminhos deve ser possível o cruzamento de dois veículos, devendo ter uma largura mínima de 6 m, e declives não superiores a 6 %.
- Em caso de troços retos poderão considerar-se locais de cruzamento, os quais devem ser construídos em pontos onde a visibilidade do condutor permita observar a aproximação de outro veículo.
- Junto a cada ponto de água, é indispensável prever sempre uma zona de manobra.
- Uma densidade adequada de caminhos de acesso poderá variar entre os 10 a 20 metros por hectare, sendo este valor calculado para situações de explorações florestais de dimensão média, significativamente superior às condições da estrutura fundiária existente em Portugal, pelo que, para o nosso país, se apresentam frequentemente valores que se situam entre os 20 e os 40 metros por hectare.
- Para o cruzamento de veículos devem prever-se locais apropriados, visíveis entre si, e espaçados no máximo de 100 a 200 m.
- O problema da erosão deve ser tido em conta na construção das redes infraestruturais. Nas situações em que o risco de erosão pode ser provocado pelo escoamento de águas superficiais, deverão construir-se valetas nas bermas dos caminhos e proceder-se à colocação de manilhas nos locais onde as linhas de água os intercetam.
- Quando estejam envolvidos trabalhos de terraplanagem na construção de estradas e caminhos florestais, estes deverão se sempre os menores possível.

- A rede viária deverá desenvolver-se, o mais possível, nas vertentes menos visíveis de forma a minimizar a deterioração paisagística.
- A construção de qualquer caminho florestal deverá ser alvo de um projeto elaborado por um técnico autorizado, garantindo-se assim que as características geométricas dos caminhos florestais verificam os critérios rodoviários de dimensionamento, adequados às condições de circulação exigidas.

Se num projeto de florestação é fácil implantar desde logo este tipo de infraestruturas, o mesmo não sucede nas áreas florestais privadas já arborizadas, sobretudo se o relevo for acidentado, dominar o minifúndio, ou a floresta se manter por regeneração natural. Neste caso, torna-se necessária a anuência dos proprietários para a cedência de áreas que inevitavelmente passarão a ser improdutivas.

Às Câmaras Municipais cabe o importante papel de promover o acordo indispensável de cada proprietário, elucidando-o dos objetivos e interesses comuns em proteger o património florestal.

Normas para a manutenção da rede viária florestal

Os dispositivos que constituem o sistema de drenagem da estrada, como as valetas, os aquedutos e os drenos transversais de superfície devem ser mantidos limpos e em boas condições de funcionamento.

A sinalização prevista para a rede viária deve manter-se atualizada.

Deve proceder-se à remoção periódica de material inflamável de drenos e aquedutos (por exemplo, folhas ou outros combustíveis finos ou mortos) de forma a evitar a ignição e a propagação do fogo de um para o outro lado da estrada.

Os locais de carregamento de material lenhoso deverão também manter-se limpos, mesmo fora dos períodos de utilização.