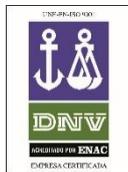


Estudo do efeito de descarga das águas  
pluviais dos túneis Monsanto/Sta.  
Apolónia e Chelas/Beato na hidrodinâmica  
local e na dinâmica sedimentar junto ao rio  
Tejo

Processo nº 0023/AQS/AD/DGES/ND/2016

Ficha de Documentação		
<b>Classificação:</b> Confidencial	<b>Distribuição</b> Câmara Municipal de Lisboa	<b>Observações</b> n/a
<b>Título</b> Estudo do efeito de descarga das águas pluviais dos túneis Monsanto/Sta. Apolónia e Chelas/Beato na hidrodinâmica local e na dinâmica sedimentar junto ao rio Tejo	<b>Title</b> Study of the dispersion of buoyant plumes in the Tagus estuary associated with two pluvial water discharges located in Santa Apolónia and Beato.	
<b>Palavras Chave</b> Água pluvial, Lisboa, Tejo, túneis, Pluma, MOHID	<b>Keywords</b> Emergency, pluvial water, Lisbon, Tagus, tunnels, Plume, MOHID	
<b>Entidade que produziu o documento</b> Hidromod, Modelação em Engenharia, Lda Rua Rui Teles Palhinha, 4, 1º, Leião, 2740-278 Porto Salvo Tel: +351 21 848 6013 Email: <a href="mailto:hidromod@hidromod.com">hidromod@hidromod.com</a>		Certificação de Qualidade ISO 9001:2008 
<b>Entidade para quem foi produzido o documento</b> Câmara Municipal de Lisboa  Contacto: Engº José Silva Ferreira		
<b>Autor</b> Paulo Chambel Leitão ( <a href="mailto:paulo.chambel@hidromod.com">paulo.chambel@hidromod.com</a> )	<b>Título</b> Engº Civil, Doutor	
<b>Verificação</b> José Chambel Leitão	<b>Título</b> Engº Civil, Doutor	
<b>Data de produção</b> 19/01/2017	<b>Nº de páginas</b> 78	<b>Nº de Referência</b> VI
<b>Observações:</b>  <b>Nesta versão foi considerado uma nova localização para a descarga do Beato localizada ~200 m a Norte da descarga original.</b>		

## Índice

1	Introdução.....	12
2	Modelo conceptual.....	13
3	Metodologia.....	17
3.1	Características das descargas pluviais.....	17
3.2	Geometria das estruturas de descarga.....	19
3.3	Malhas de cálculo.....	23
3.4	Configuração do modelo hidrodinâmico.....	25
4	Resultados.....	28
4.1	Dinâmica 3D da pluma.....	28
4.1.1	Santa Apolónia.....	28
4.1.2	Beato.....	30
4.2	Velocidade à superfície - campo próximo.....	31
4.2.1	Santa Apolónia.....	32
4.2.2	Beato.....	37
4.3	Transporte de sedimentos.....	43
4.4	Dispersão de poluentes.....	50
4.4.1	Dimensão da pluma.....	51
4.4.2	Persistência temporal da pluma.....	61

5	Conclusões.....	71
6	Referências.....	72
7	Anexo - Validação do modelo hidrodinâmico.....	75
7.1	Nível do mar.....	75
7.2	Correntes.....	76

## Índice de figuras

<i>Figura 1 – Descrição esquemática da dispersão da pluma de águas pluviais numa situação de enchente em corte e em planta.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2 - Salinidade média anual (POET, 2013). .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3 - Descrição esquemática da dispersão da pluma de águas pluviais numa situação de vazante em corte e em planta. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 - Descrição esquemática da interação da pluma da descarga de Santa Apolónia no cenário com um muro localizado na frente cais.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5 - Descrição esquemática da dispersão da pluma da descarga do Beato no cenário em que a descarga é submersa.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 – Cenários de caudal para o túnel de Santa Apolónia. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7 - Cenários de caudal para o túnel do Beato. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 - Cenários de caudal (período de retorno de 100 anos) simulados para o túnel de Santa Apolónia para duas situações de maré: linha preta – caudal em maré viva, linha azul –caudal em maré morta. A situação de maré pode ser observada com base na série temporal de nível (linha cinzenta tracejada). São também assinalados os instantes em que se assumiu que ocorre o caudal máximo em situação de maré viva (baixa-mar): 21h40 m, 4/7/2012 e em situação de maré morta (preia-mar): 23h10m, 13/7/2012... </i>	<i>19</i>
<i>Figura 9 – Zona terminal do túnel de Santa Apolónia sobreposta à malha de cálculo do campo próximo. A cor representa a profundidade no referencial hidrográfico. A linha contínua preta em frente da saída do túnel representa o muro projetado. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10 – Corte da zona terminal do túnel de Santa Apolónia (fonte: Hidra). A estrutura de cor azul corresponde a um muro a colocar na frente cais com o objetivo de forçar a pluma ter uma orientação mais paralela ao cais possível. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11 - Zona terminal do túnel do Beato sobreposta à malha de cálculo do campo próximo. A cor representa a profundidade no referencial hidrográfico. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12 – Desenho esquemático em perfil da zona terminal do túnel do Beato (fonte: Engidro). ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 13 - Zona terminal do túnel do Beato, segunda alternativa testada, sobreposta à malha de cálculo do campo próximo. A cor representa a profundidade no referencial hidrográfico.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 14 - Corte da zona terminal do túnel do Beato para a segunda alternativa de descarga (fonte: Engidro). ....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 15. Domínio modelação implementado para geração da maré na Península Ibérica (6 km de resolução) e região centro/sul de Portugal para propagação da maré (1 km de resolução). ....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 16. Domínio do Estuário do Tejo (200 m de resolução). ....</i>	<i>24</i>

<i>Figura 17. Domínio local que inclui as malhas de cálculo que permitem simular o campo afastado de cada pluma (25 m de resolução) e duas malhas de cálculo com uma resolução de 5 m que permitem simular o campo próximo. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 18. Domínio local que inclui duas malhas de cálculo que permitem simular o campo afastado (25 m de resolução) e o campo próximo (resolução de 5 m). Esta última malha é focada na segunda localização testada (~200 m a Norte da primeira) para a zona do Beato.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 19. Configuração da cascata de modelos utilizada para simular os processos à escala das duas plumas de interesse. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 20 – Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma de Santa Apolónia para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga sem muro. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: lado esquerdo – corte na direção normal ao cais, lado direito – campo superficial.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 21 – Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma de Santa Apolónia para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga com muro. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: lado esquerdo – corte na direção normal ao cais, lado direito – corte paralelo ao cais. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 22 – Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma do Beato para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga superficial. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: painel esquerdo – corte na direção normal ao cais, painel direito - campo superficial.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 23 – Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma do Beato para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga em profundidade. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: painel esquerdo – corte na direção normal ao cais, painel direito - campo superficial.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 24 - Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma do Beato (localização alternativa) para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga em profundidade. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: painel esquerdo – corte na direção normal ao cais, painel direito - campo superficial. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 25 – Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) sem muro para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar. .</i>	<i>32</i>
<i>Figura 26 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) sem descarga (situação de referência), maré viva/meio da vazante. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 27- Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar. .</i>	<i>34</i>

<i>Figura 28 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.</i>	35
<i>Figura 29 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) sem muro para uma situação de caudal de cheia com um período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.</i>	36
<i>Figura 30 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia com um período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.</i>	36
<i>Figura 31 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia com um período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.</i>	37
<i>Figura 32 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga à superfície para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.</i>	38
<i>Figura 33 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.</i>	38
<i>Figura 34 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.</i>	39
<i>Figura 35 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.</i>	39
<i>Figura 36 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.</i>	40
<i>Figura 37 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga à superfície para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.</i>	41
<i>Figura 38 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.</i>	41

<i>Figura 39 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 40 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 41 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 42 – Amostras de sedimentos em vários pontos do estuário (Franz, 2016 adaptado de Canário et al., 2007).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 43 – Santa Apolónia, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga com muro. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 44 - Beato, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga em profundidade. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 45 - Beato, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva, localização alternativa e descarga em profundidade. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 46 - Beato, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga à superfície.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 47 – Santa Apolónia, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga sem muro.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 48 - Diluição mínima à superfície para a pluma de Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré viva em baixa-mar. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 49 - Diluição mínima à superfície para a pluma de Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré morta em preia-mar.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 50 - Diluição mínima à superfície para a pluma de Santa Apolónia para uma cheia frequente sem muro em maré viva em baixa-mar. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 51 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (primeira localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré viva em baixa-mar.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 52 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (primeira localização testada) para uma cheia frequente descarga à superfície em maré viva em baixa-mar. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 53 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (primeira localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré morta em preia-mar.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 54 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (segunda localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré viva em baixa-mar.....</i>	<i>60</i>

<i>Figura 55 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (segunda localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré morta em preia-mar.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 56 – Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré viva em baixa-mar. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 57 – Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré morta em preia-mar. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 58 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para Santa Apolónia para uma cheia frequente sem muro em maré viva em baixa-mar. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 59 – Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para o Beato para uma cheia frequente com descarga à superfície em maré viva em baixa-mar. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 60 – Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para o Beato para uma cheia frequente com descarga em profundidade em maré viva em baixa-mar. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 61 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para o Beato para uma cheia frequente com descarga em profundidade em maré morta em preia-mar. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 62 – Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para a localização alternativa do Beato para uma cheia frequente com descarga em profundidade em maré viva em baixa-mar.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 63 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para a localização alternativa do Beato para uma cheia frequente com descarga em profundidade em maré morta em preia-mar.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 64 – Localização das estações de monitorização.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 65. Comparação entre o nível de maré medido no marégrafo de Cascais (pontos roxo) e o previsto pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B) e para 3 dias em agosto de 2012 (C). ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 66. Comparação entre as correntes medidas no local B1 (pontos roxo) e os valores previstos pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B), para 5 dias de marés vivas em agosto de 2012 (C) e 5 dias de marés mortas em agosto de 2012. ....</i>	<i>77</i>

## Índice de tabelas

<i>Tabela 1 - Resumo do sistema de modelação que permite simular a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos no Estuário do Tejo.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 2 - Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas do nível do mar e os valores previstos pelo modelo no local do marégrafo de Cascais para o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2012. ...</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 3 - Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas de correntes e os valores previstos pelo modelo no local B1 para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012. ....</i>	<i>78</i>

## Equipa Técnica

Nome	Funções	Formação
José Chambel Leitão	Coordenação geral	Eng. Civil, Doutor em Eng. Mecânica
Paulo Chambel Leitão	Coordenação técnica, simulações hidrodinâmicas e de processos de transporte	Eng. Civil, Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação do Ambiente Marinho, Doutor em Eng. do Ambiente
Ramiro Neves	Consultor	Prof. Associado do IST, Docteur en Sciences Appliquées pela Universidade de Liège
João Rodrigues	Simulações hidrodinâmicas e de processos de transporte	Licenciado em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física
João Ribeiro	Processamento de dados e de resultados da modelação numérica	Licenciado em Ciências do Mar
Ana Oliveira	Processamento de dados e de resultados da modelação numérica	Licenciada e Mestre em Engenharia Civil

## 1 Introdução

Este documento visa apresentar um estudo de modelação numérica que resultou de uma aquisição de serviços, por parte da Câmara Municipal intitulada "*Estudo do efeito de descarga das águas pluviais dos túneis Monsanto/Sta. Apolónia e Chelas/Beato na hidrodinâmica local e na dinâmica sedimentar junto ao rio Tejo*" processo nº 0023/AQS/AD/DGES/ND/2016. Estas descargas consistem no desvio de caudais de origem pluvial recorrendo a 2 túneis: um de cerca de 5 km (túnel de Monsanto-Santa Marta-Santa Apolónia) e outro de cerca de 1 km (túnel Chelas-Beato). Para este último foram testadas duas localizações para a descarga espaçadas de 200 m.

Este estudo caracteriza o efeito das plumas sobre o campo de correntes e processos de transporte locais. Foram testados 2 cenários de caudal, um extremo correspondente a um período de retorno de 100 anos e um caudal frequente (que em média poderá ocorrer 5 vezes por ano). Os cenários de caudal foram testados para duas situações de maré: baixa-mar de maré viva e preia-mar de maré morta. Foram também testados para cada túnel duas soluções de descarga.

A caracterização do efeito da pluma sobre a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar foi feita recorrendo ao modelo numérico MOHID ([www.mohid.com](http://www.mohid.com)). Este modelo permite simular diferentes processos marinhos em que se incluem os principais processos que condicionam a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar em estuários.

Num primeiro capítulo será apresentado o modelo conceptual que esteve na génese da implementação do modelo 3D baroclínico implementado para simular o impacte das duas plumas já referidas. O mesmo modelo conceptual serviu de base para a definição dos cenários simulados. Nos capítulos seguintes é feita uma descrição da metodologia seguida e dos resultados que ilustram os impactes ao nível da hidrodinâmica, do transporte sedimentar e da dispersão de potenciais poluentes. Por fim, são apresentadas as conclusões do estudo.

## 2 Modelo conceptual

O impacto sobre a hidrodinâmica local da descarga no estuário de águas pluviais coletadas pelos túneis de Monsanto/Sta. Apolónia e Chelas/Beato será tanto maior quanto maior for o caudal pluvial e menor o nível de água no estuário (Figura 1). Este nível tende a ser mínimo em baixa-mar de maré viva. A baixa-mar pode também ser descrita como início de enchente. Esta situação de maré permite simular a situação mais desfavorável do ponto vista hidrodinâmico porque permite que o gradiente de nível entre o escoamento nos túneis e no estuário seja máximo o que induz velocidades máximas nas secções de descarga. Adicionalmente permite simular o impacto que a pluma poderá ter a montante do ponto de descarga em termos de transporte de massa (e.g. poluentes).

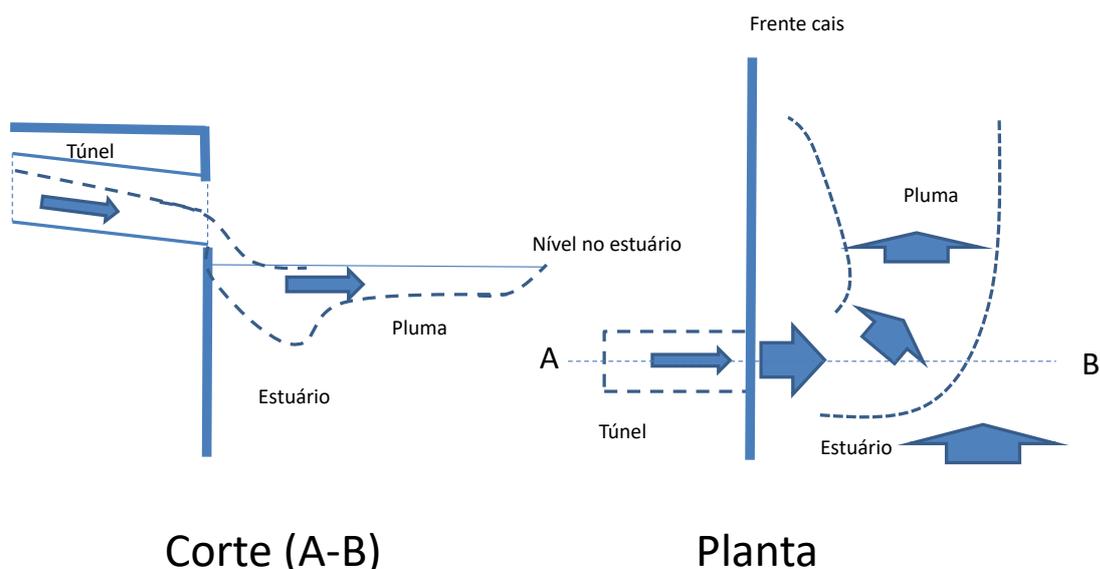
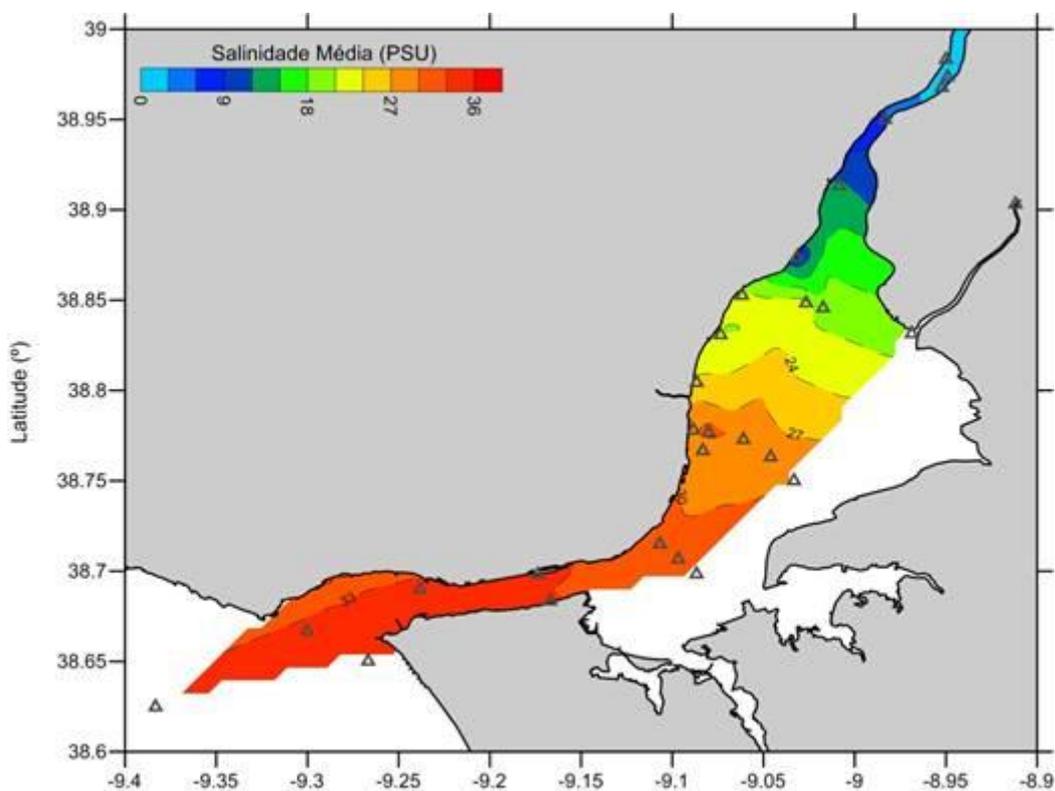


Figura 1 - Descrição esquemática da dispersão da pluma de águas pluviais numa situação de enchente em corte e em planta.

A salinidade média nos pontos de descarga dos dois túneis é da ordem de 30 psu<sup>1</sup> (Figura 2) podendo em períodos em que o caudal do rio Tejo seja baixo atingir valores

<sup>1</sup> psu são unidades adimensionais de medida da salinidade (*Practical Salinity Units*) aproximadamente equivalentes à quantidade de sais dissolvidos na água, em g/kg.

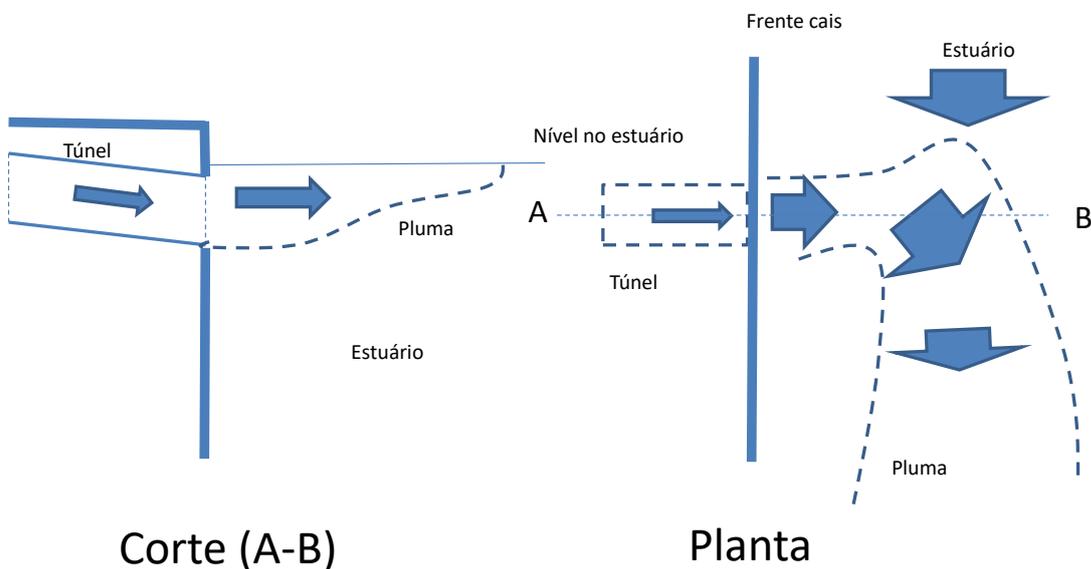
próximos de 36 psu (salinidade característica de massas de água costeiras). O facto do meio recetor apresentar salinidades elevadas tende a condicionar de forma muito intensa o processo de mistura de quantidade de movimento e massa associadas às duas descargas de água pluviais em análise. O facto do meio recetor apresentar uma densidade superior ao das descargas tende a inibir a mistura vertical devido à estratificação que se estabelece entre a interface da água doce de origem pluvial e a água salgada do meio recetor. No caso em que a descarga se faça à superfície o resultado é um jato intenso que apenas se dispersa na direção horizontal. A estratificação funciona quase como um constrangimento na secção de saída da descarga (Figura 1).



*Figura 2 - Salinidade média anual (POET, 2013).*

Outro cenário importante em termos de dispersão do jato é a situação de início de vazante (ou preia-mar). Este cenário permite quantificar o impacto das plumas das descargas na zona a jusante. Neste caso a situação mais desfavorável do ponto de vista hidrodinâmico será uma preia-mar de maré morta porque será para todas as preia-

mares aquela que dará origem a um maior gradiente de nível entre o meio recetor e a descarga.



*Figura 3 - Descrição esquemática da dispersão da pluma de águas pluviais numa situação de vazante em corte e em planta.*

Como referido anteriormente a diferença de densidade entre a descarga de água pluvial e o meio recetor tenderá a gerar um jato muito restringido à superfície. O jato poderá ter associadas velocidades elevadas, perpendiculares ao alinhamento do cais, em zonas de movimentação de embarcações. De forma a testar opções diferentes de descarga, no que respeita às velocidades perpendiculares ao cais, foram consideradas duas soluções de engenharia para a descarga quer em Santa Apolónia quer no Beato.

No caso de Santa Apolónia a descarga é feita debaixo de um cais sustentado em estacas que se prolonga para jusante. Uma solução testada é a da descarga debaixo do cais sem nenhuma restrição ao escoamento. A segunda solução de engenharia consiste num muro com um desenvolvimento semelhante à secção de saída montada na frente do Cais. Este muro por um lado irá forçar a pluma a ter uma orientação paralela à margem na direção de jusante e por outro irá induzir mistura vertical e assim reduzir as correntes à superfície (Figura 4).

No caso do Beato, as duas soluções a estudar diferem apenas na cota de saída para o estuário: uma mais próxima da superfície livre e outra completamente submersa. A descarga que fica submersa funciona como um grande difusor com uma secção cujo topo está a abaixo do zero hidrográfico (Figura 5). O facto de a descarga se fazer em profundidade irá induzir uma intensa mistura forçada pelos gradientes de velocidade e pela força de impulsão.

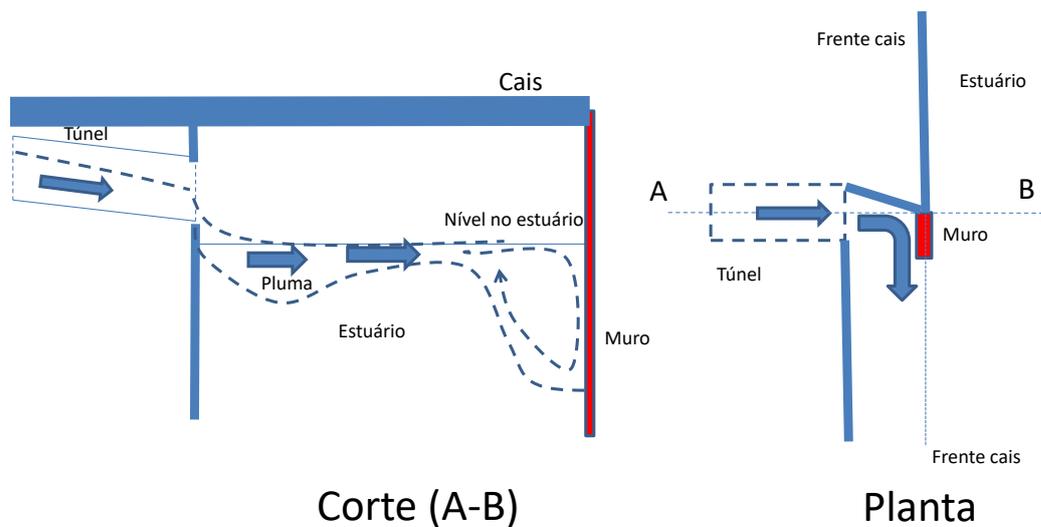


Figura 4 - Descrição esquemática da interação da pluma da descarga de Santa Apolónia no cenário com um muro localizado na frente cais.

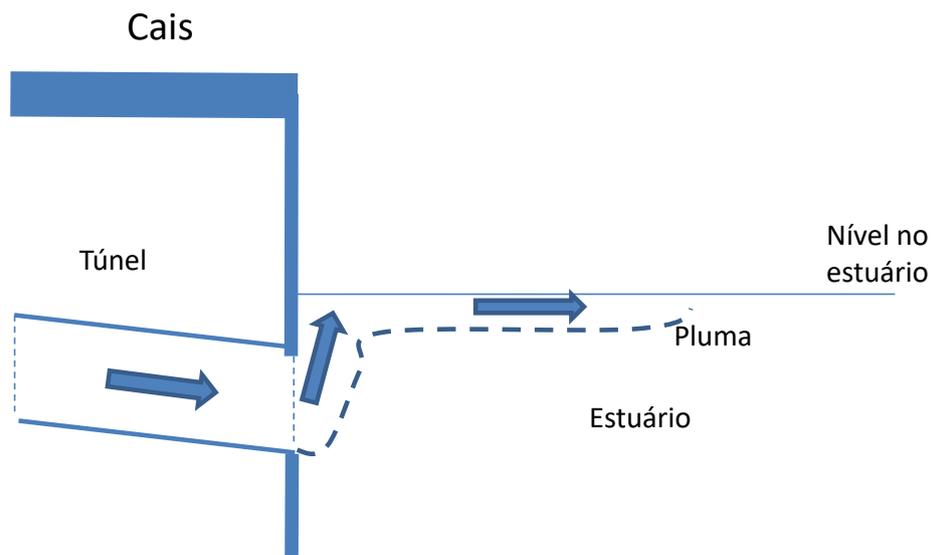


Figura 5 - Descrição esquemática da dispersão da pluma da descarga do Beato no cenário em que a descarga é submersa

## 3 Metodologia

Para estudar o efeito da descarga na hidrodinâmica local e na dinâmica sedimentar, foi implementado um modelo hidrodinâmico de alta resolução com uma malha de 5 metros de passo espacial (na zona próxima) e com 15 camadas cujas condições de fronteira são definidas recorrendo a uma cadeia de modelos encaixados (*downscaling*). Esta metodologia permitirá simular com grande detalhe os processos 3D hidrodinâmicos e de dispersão no campo próximo e afastado das plumas de água doce, com origem em cada um dos túneis.

Foram simulados 2 cenários de caudal de cheia: um com período de retorno de 100 anos e outro que em média poderá ocorrer 5 vezes por ano. Foram consideradas duas condições de maré para o instante em que se atinge o pico máximo de caudal da descarga: baixa-mar de maré viva e preia-mar de maré morta.

### 3.1 Características das descargas pluviais

As características das descargas pluviais simuladas, e que se descrevem abaixo, foram definidas pelas empresas de consultoria Hidra e Engidro.

As séries temporais de caudal para o caso de Santa Apolónia, para a situação de cheia frequente (ocorrendo cerca de 5 vezes ao ano) e de cheia com um período de retorno de 100 anos, estão representadas na Figura 6. A mesma informação para o Beato é apresentada na Figura 7. Em ambos os casos o valor máximo de caudal para um período de retorno de 100 anos é da ordem de 150 m<sup>3</sup>/s e para a cheia frequente da ordem de 30 m<sup>3</sup>/s.

A janela temporal em que existem valores de caudais significativos é de cerca de 4 h para o cenário de caudal de cheia frequente e de cerca de 5 h para o caudal de cheia com período de retorno de 100 anos. Tendo por base estas escalas temporais, foi definido um tempo de simulação igual para todas as simulações de 7 horas.

Para ambas as descargas assume-se uma concentração de sólidos suspensos totais (SST) da ordem de 100 mg/l.

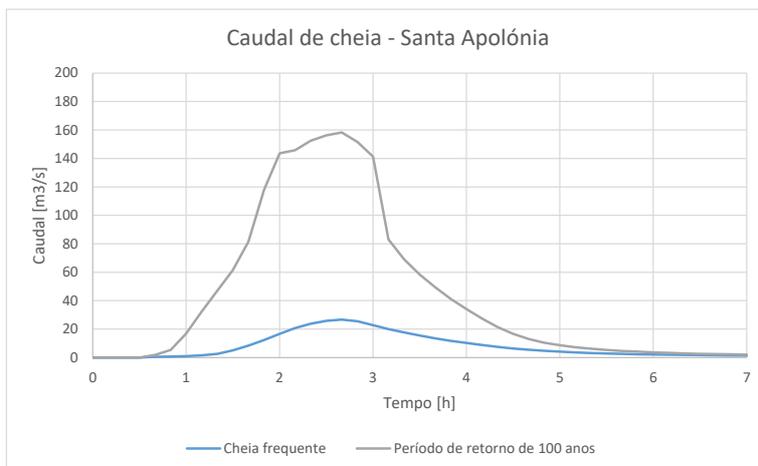


Figura 6 - Cenários de caudal para o túnel de Santa Apolónia.

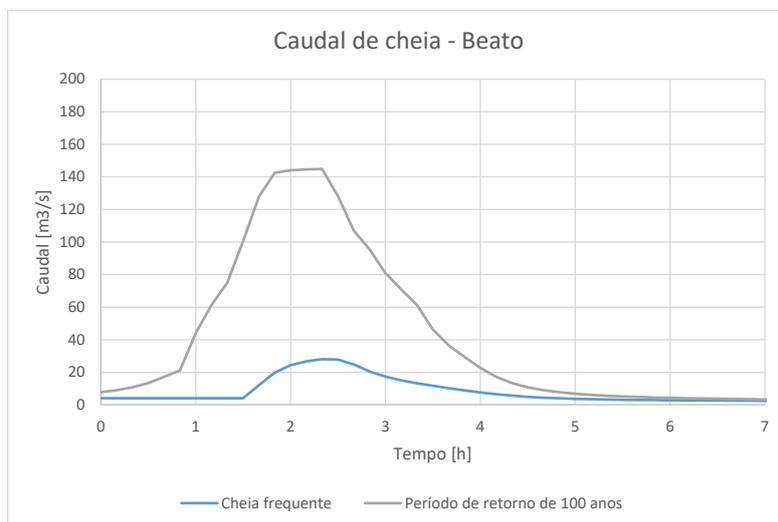


Figura 7 - Cenários de caudal para o túnel do Beato.

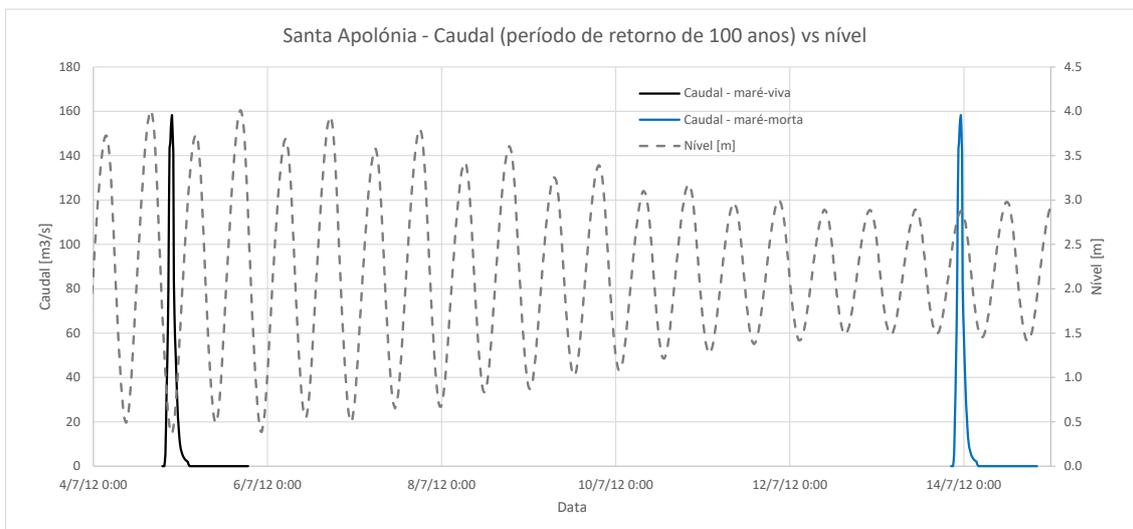


Figura 8 - Cenários de caudal (período de retorno de 100 anos) simulados para o túnel de Santa Apolónia para duas situações de maré: linha preta - caudal em maré viva, linha azul - caudal em maré morta. A situação de maré pode ser observada com base na série temporal de nível (linha cinzenta tracejada). São também assinalados os instantes em que se assumiu que ocorre o caudal máximo em situação de maré viva (baixa-mar): 21h40 m, 4/7/2012 e em situação de maré morta (preia-mar): 23h10m, 13/7/2012.

### 3.2 Geometria das estruturas de descarga

No caso de Santa Apolónia as geometrias testadas foram definidas pela empresa Hidra. Na Figura 9 e na Figura 10 apresenta-se a zona terminal do túnel de Santa Apolónia em planta e em corte, respetivamente. No corte está assinalado a azul um muro alinhado com a frente cais que visa forçar a pluma a ter uma direcção o mais paralela possível à frente cais. É também possível visualizar este muro na vista em planta (Figura 9). Foram testadas duas geometrias, uma com e outra sem muro.

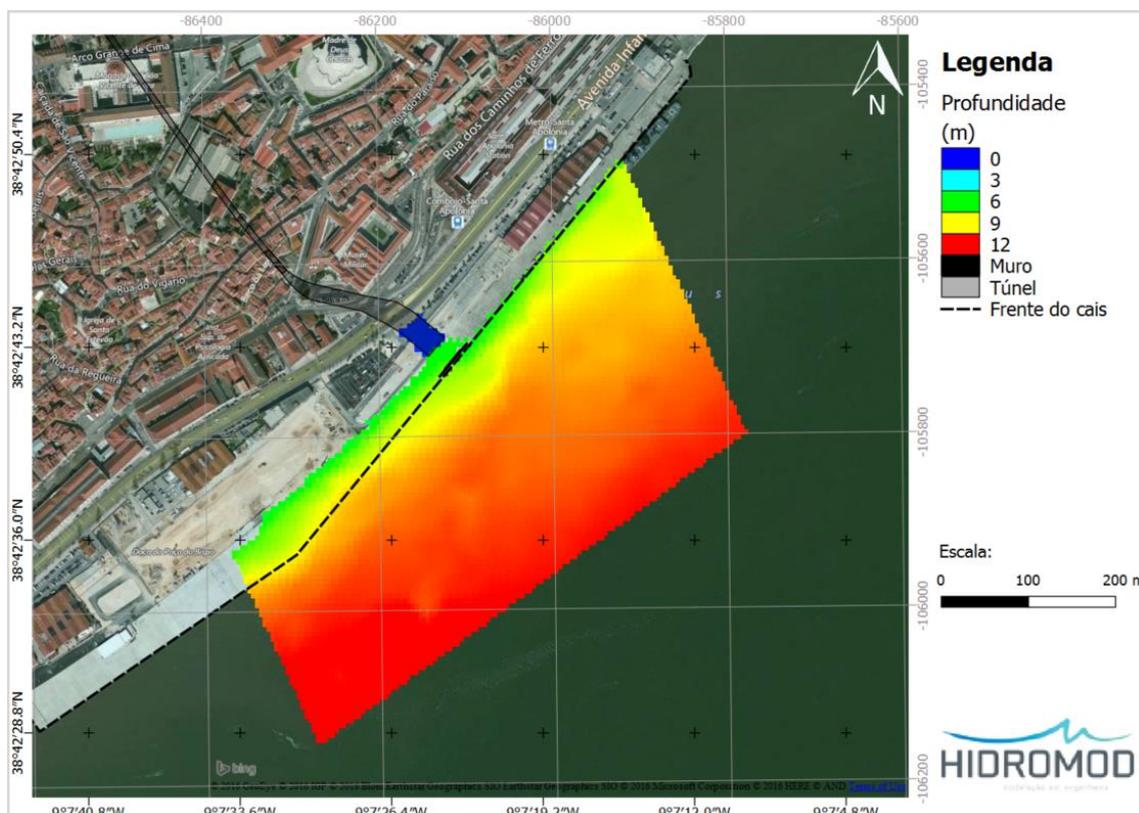


Figura 9 - Zona terminal do túnel de Santa Apolónia sobreposta à malha de cálculo do campo próximo. A cor representa a profundidade no referencial hidrográfico. A linha contínua preta em frente da saída do túnel representa o muro projetado.

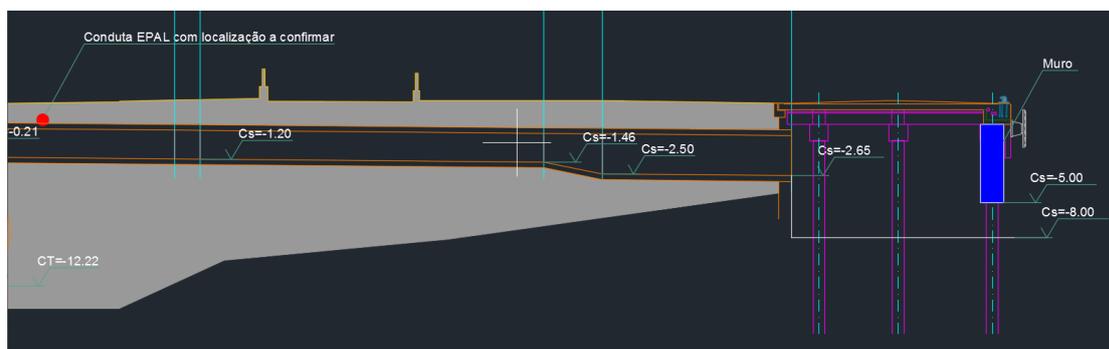


Figura 10 - Corte da zona terminal do túnel de Santa Apolónia (fonte: Hidra). A estrutura de cor azul corresponde a um muro a colocar na frente cais com o objetivo de forçar a pluma ter uma orientação mais paralela ao cais possível.

Já no caso da pluma do Beato, as geometrias testadas foram definidas pela empresa Engidro. Na Figura 11 e na Figura 12 apresenta-se um esquema da primeira zona terminal do túnel do Beato testada, em planta e em corte, respetivamente. No corte representa-se o túnel na configuração de descarga em profundidade no meio recetor (Figura 12).

O segundo cenário corresponde a uma descarga em superfície que corresponde a alargar o túnel na vertical removendo a área triangular assinalada a azul na Figura 12.

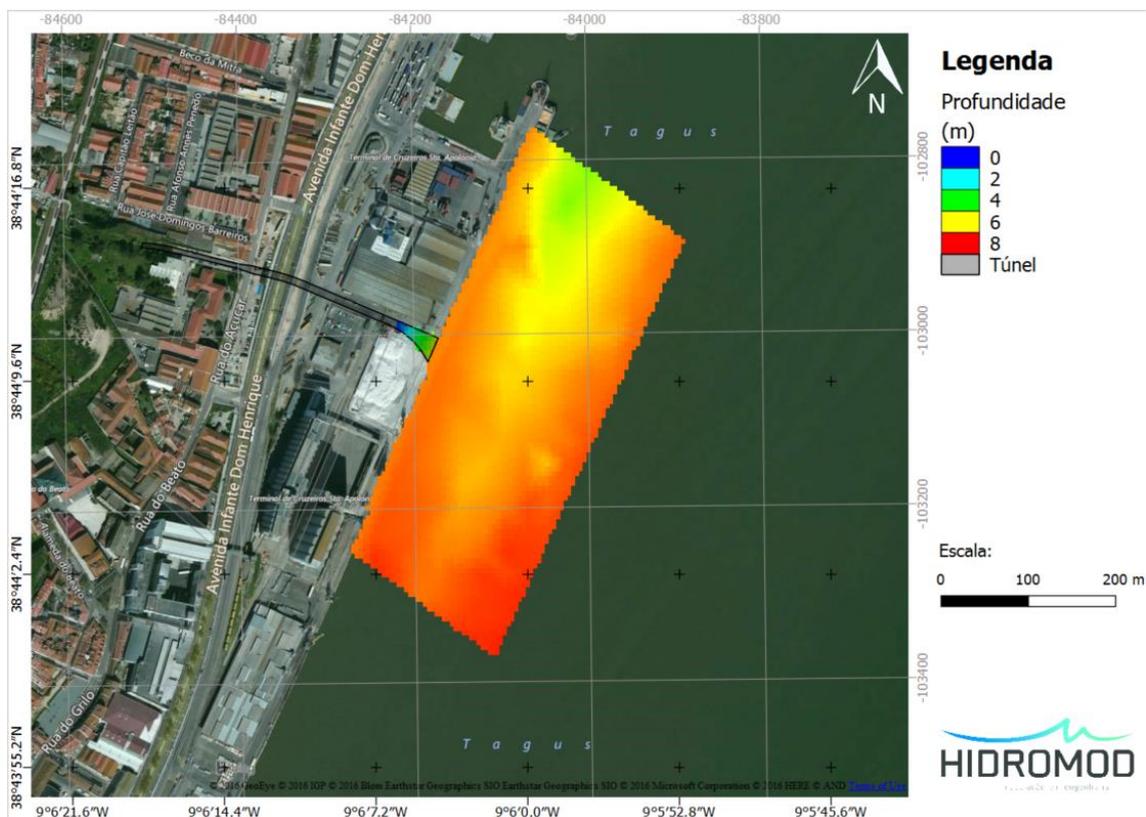


Figura 11 - Zona terminal do túnel do Beato sobreposta à malha de cálculo do campo próximo. A cor representa a profundidade no referencial hidrográfico.

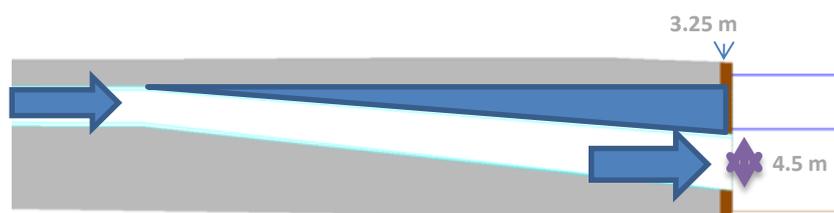


Figura 12 - Desenho esquemático em perfil da zona terminal do túnel do Beato (fonte: Engidro).

Foi testada uma segunda alternativa para a zona terminal do túnel do Beato, localizada 200 m mais a Norte da primeira opção testada (Figura 13). Neste caso só foi testada a descarga em profundidade porque as simulações feitas para a primeira opção mostram que a descarga em superfície tende a gerar velocidades muito intensas junto ao cais.



### 3.3 Malhas de cálculo

As malhas de cálculo foram efetuadas considerando 3 escalas de resolução:

- A escala regional (e.g., modelo da península ibérica e da região centro/sul de Portugal);
- A escala do Estuário do Tejo;
- A escala local (i.e., campo próximo e campo afastado das plumas).

Para estas 3 escalas foram adotadas as seguintes resoluções espaciais:

- escala regional - 6 km e 1 km (dois domínios - Figura 15);
- escala do Estuário do Tejo - 200 m para a (Figura 16);
- escala local - 25 m (campo afastado) e 5 m (campo próximo) (dois domínios - Figura 17).

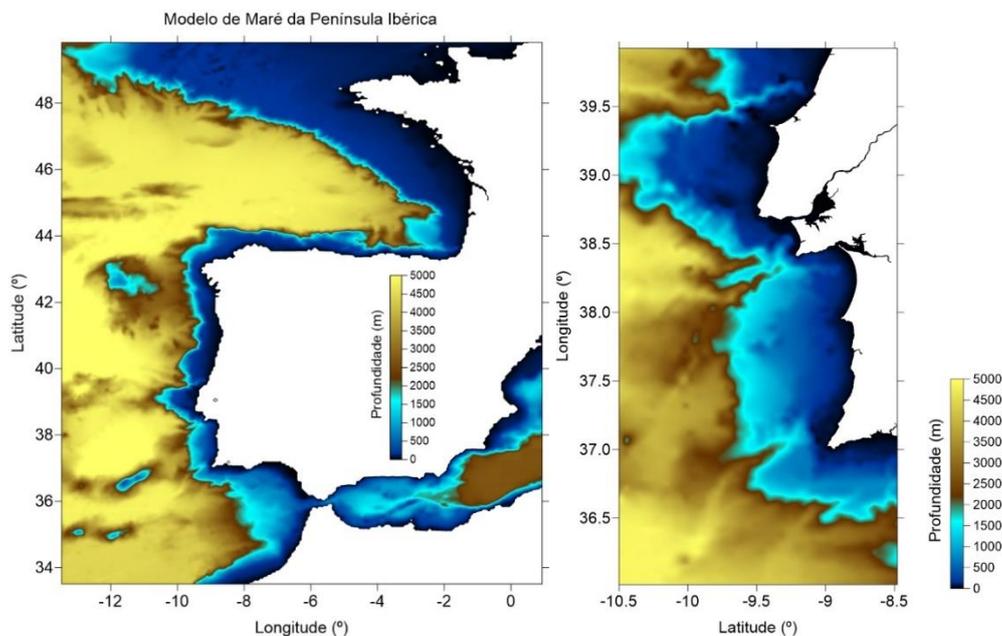


Figura 15. Domínio modelação implementado para geração da maré na Península Ibérica (6 km de resolução) e região centro/sul de Portugal para propagação da maré (1 km de resolução).

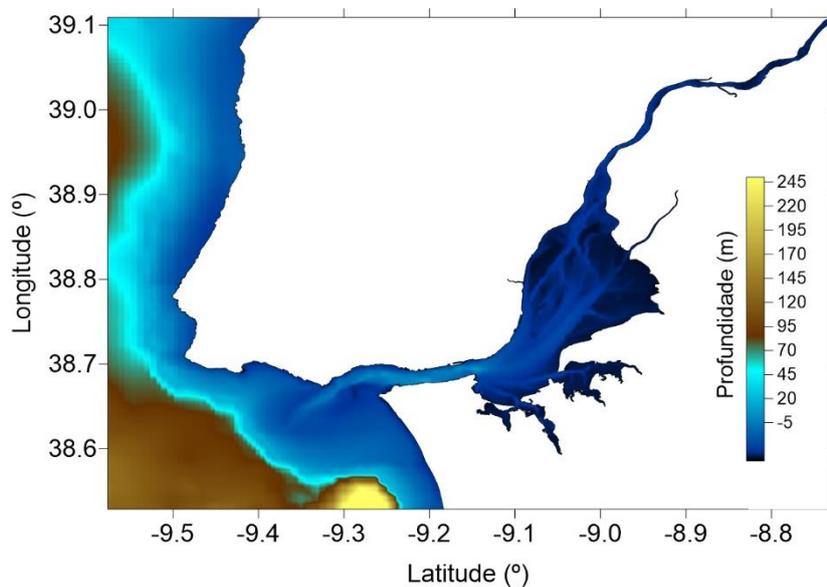
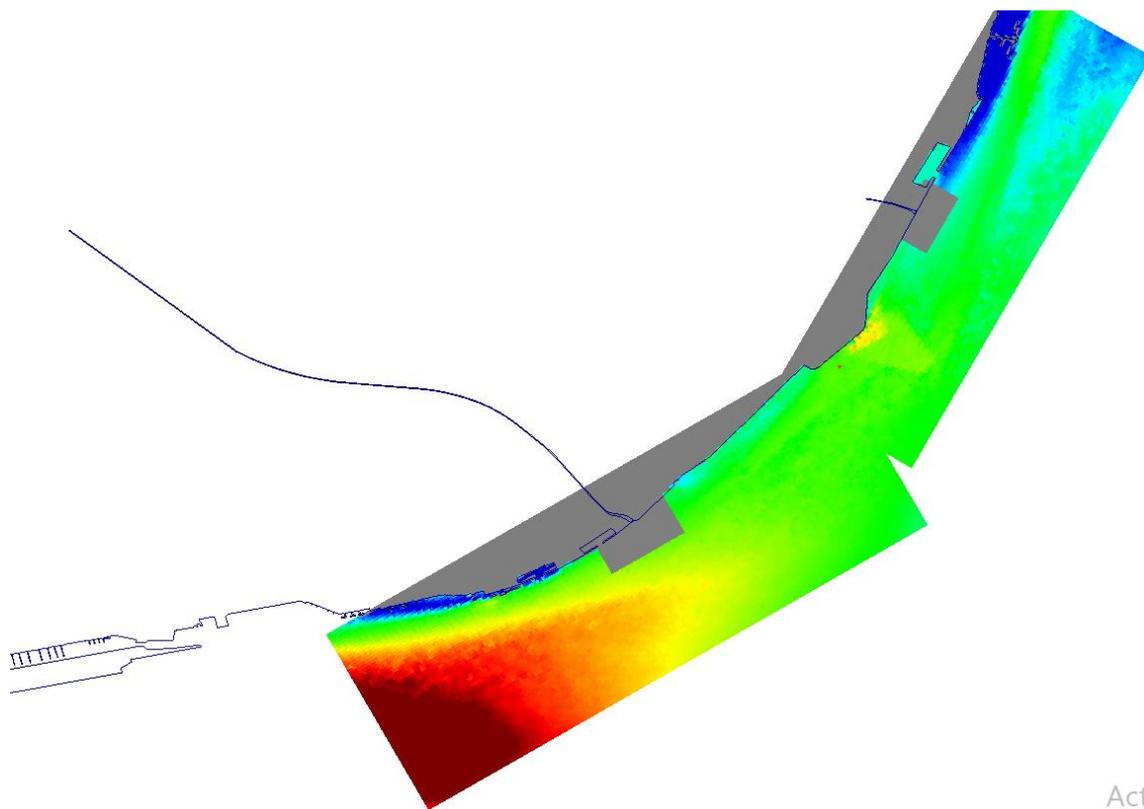
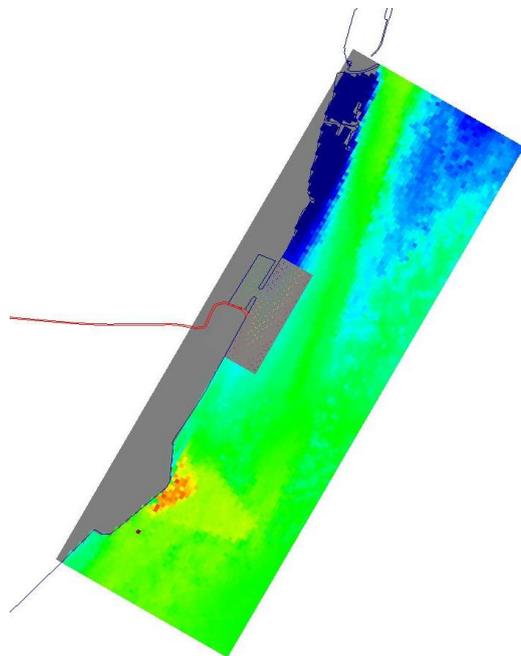


Figura 16. Domínio do Estuário do Tejo (200 m de resolução).



Acti

Figura 17. Domínio local que inclui as malhas de cálculo que permitem simular o campo afastado de cada pluma (25 m de resolução) e duas malhas de cálculo com uma resolução de 5 m que permitem simular o campo próximo.



*Figura 18. Domínio local que inclui duas malhas de cálculo que permitem simular o campo afastado (25 m de resolução) e o campo próximo (resolução de 5 m). Esta última malha é focada na segunda localização testada (~200 m a Norte da primeira) para a zona do Beato.*

### 3.4 Configuração do modelo hidrodinâmico

O estudo baseia-se no modelo numérico MOHID (<http://www.mohid.com>) que já foi implementado ao estuário do Tejo no âmbito de diversos estudos de consultoria (e.g. Hidromod, 2003) e científicos (Canas et al., 2009, Vaz et al., 2011, Vaz et al., 2014, Vaz et al., 2015). No caso do presente estudo optou-se por uma metodologia de implementação baseada numa filosofia de modelos encaixados. Esta metodologia tem sido utilizada em diversos estudos e aplicações do modelo MOHID a diferentes locais para além do estuário do Tejo, como por exemplo: costa Algarvia (Leitão et al., 2005), estuário de Santos (Leitão et al., 2004), lagoa de Óbidos (Malhadas et al., 2009), Ria de Aveiro (Vaz et al., 2007), costa portuguesa (Mateus et al., 2012, Malhadas et al., 2015), estreito de Malaca (Bartolomeu et al., 2014), País Basco Francês (Delpey et al., 2014), etc.

A metodologia desenvolvida representa uma solução eficiente na resolução dos problemas das diferentes escalas, porque permite fazer *downscaling* a partir duma solução de menor resolução e incluir nos modelos locais os processos de grande escala. Desta forma é possível integrar processos desde a escala dos milhares de quilómetros, como é o caso da propagação da maré na costa, com processos da escala dos metros, como é o caso dos processos que ocorrem nos canais. A comunicação entre modelos é feita *one-way*, ou seja, os modelos de maior escala influenciam os modelos de menor escala, mas o contrário não ocorre. Os modelos "pai" vão transmitir a informação para os seus "filhos" e assim sucessivamente permitindo que a informação de uns seja a condição de fronteira dos outros.

Para este projeto foi considerado um sistema com 5 níveis encaixados (Figura 19- Malhadas *et al.*, 2015).

O primeiro nível, que abrange toda a Península Ibérica, é um modelo bidimensional que simula a propagação da maré na Costa Portuguesa e corre em modo operacional na Hidromod. Tem uma malha de resolução de cerca de 6 km de resolução espacial e inclui o efeito da maré através da utilização do modelo global de maré FES2012.

O nível 2 compreende a Costa Algarve - Lisboa com resolução de 1 km x 1 km e recebe as condições de fronteira do nível anterior (modelo de maré da Península Ibérica). Este modelo serve para propagar as condições de oceano aberto para o modelo do Estuário do Tejo. O nível 3 abrange o Estuário do Tejo com resolução de 200 metros. Este domínio de modelação recebe condições de fronteira do nível anterior. Este nível inclui igualmente as descargas fluviais nos rios: Tejo, Trancão e Sorraia. Os valores de caudal considerados para o Rio Tejo correspondem a dados horários medidos na estação de Almourol (<http://snirh.apambiente.pt>). Para os Rios Sorraia e Trancão são impostas médias mensais de caudal obtidas com base no histórico de monitorização (<http://snirh.apambiente.pt>).

O nível 4 abrange duas malhas com uma resolução de 25 m centradas nos túneis de Santa Apolónia e Beato respetivamente. Este nível está focado em simular o impacto 3D das plumas sobre o meio recetor. O nível 5 tem os mesmos objetivos do nível 4 mas com uma resolução horizontal de 5 m o que permite simular com grande detalhe



## 4 Resultados

Este capítulo encontra-se estruturado de forma a quantificar os impactos das plumas sobre o meio recetor de acordo com o Caderno de Encargos (hidrodinâmica e sedimentos). Também é quantificada a capacidade do meio recetor em dispersar as plumas.

Inicialmente é avaliado o efeito que as diferentes opções consideradas para a geometria da descarga têm sobre a estrutura 3D das plumas. De seguida é feita uma avaliação mais fina do impacto das plumas, para as diferentes opções de descarga, sobre o campo de velocidades à superfície em especial ao longo da frente cais. Uma avaliação dos impactos sobre o transporte de sedimentos é também apresentada. Por fim, é caracterizada a capacidade de dispersão do meio recetor com base numa propriedade conservativa.

Em anexo é apresentada a validação do modelo hidrodinâmico.

### 4.1 Dinâmica 3D da pluma

Como foi descrito no capítulo "Modelo conceptual" existe uma diferença importante de densidade entre o caudal pluvial descarregado pelos túneis em situação de cheia (água doce com cerca de 0 psu) e o meio recetor que apresenta salinidades em situação de verão muito semelhantes às que se observam na zona costeira (36 psu). Esta diferença de densidade condiciona a evolução da pluma no meio recetor.

#### 4.1.1 Santa Apolónia

No caso de Santa Apolónia, no cenário sem muro, o modelo apresenta para todos os cenários de caudal e maré uma pluma restringida à superfície (Figura 20). O muro tem o mérito de aumentar a mistura vertical na zona próxima do ponto de descarga o que permite diminuir a intensidade da velocidade à superfície uma vez que a espessura da pluma aumenta (Figura 21). Outro efeito do muro é forçar o eixo da pluma a ter uma orientação mais paralela ao cais (Figura 21). Desta forma existe uma redução da componente normal da velocidade ao longo da frente cais.

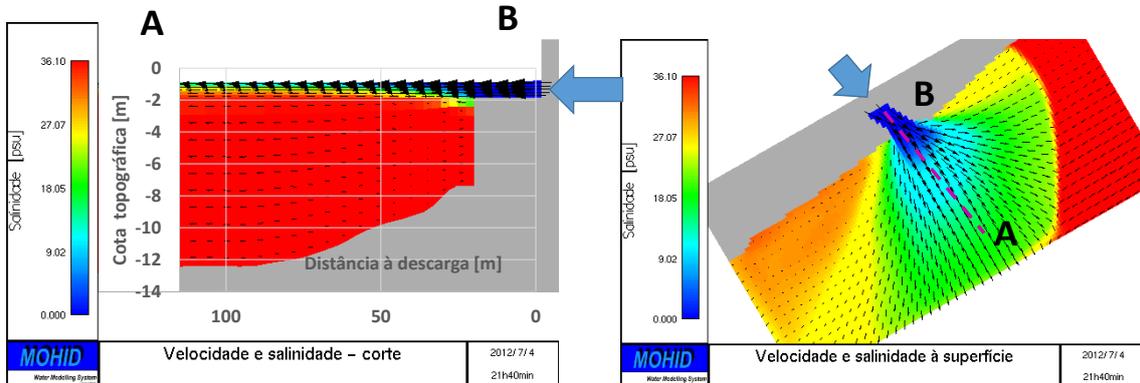


Figura 20 - Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma de Santa Apolónia para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga sem muro. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: lado esquerdo - corte na direção normal ao cais, lado direito - campo superficial.

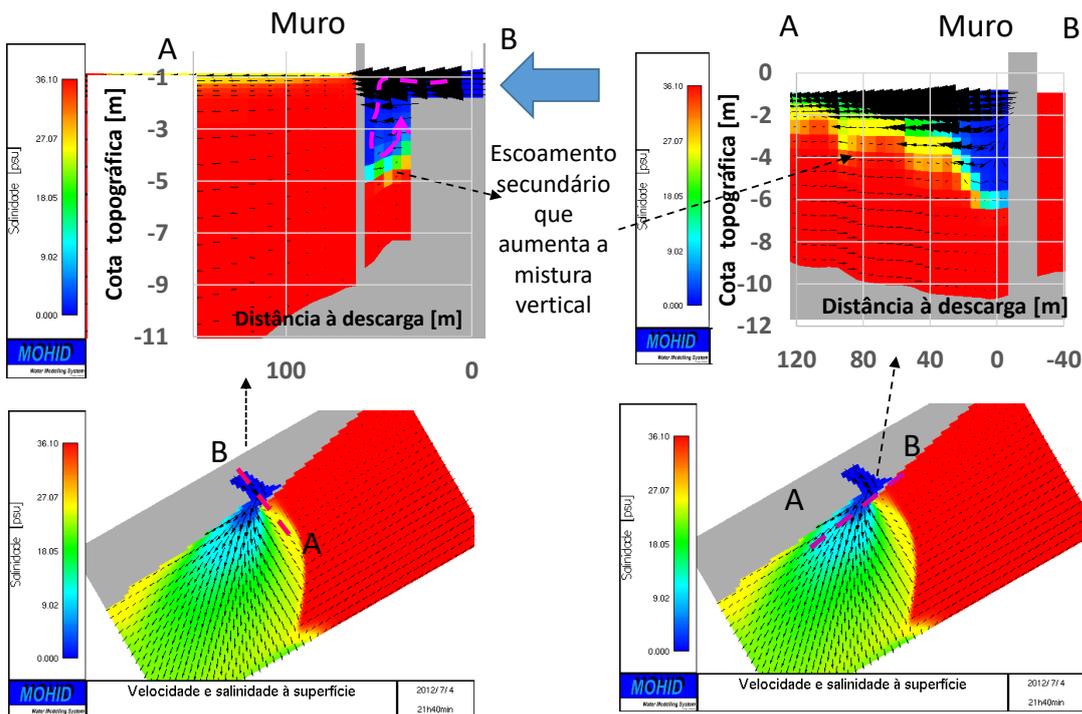


Figura 21 - Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma de Santa Apolónia para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga com muro. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: lado esquerdo - corte na direção normal ao cais, lado direito - corte paralelo ao cais.

#### 4.1.2 Beato

O Beato apresenta resultados semelhantes aos obtidos para Santa Apolónia, para o caso em que a descarga é feita à superfície (Figura 22). A descarga em profundidade permite aumentar a dispersão da pluma reduzindo significativamente a velocidade junto à frente cais (Figura 23). Na localização alternativa este efeito de dispersão ainda é mais intenso (Figura 24) uma vez que se optou por aumentar a secção e aprofundar a cota de soleira da zona terminal do túnel de descarga (Figura 14).

No entanto, devido ao efeito da força de impulsão, continua a ser bem visível a pluma com origem na descarga pluvial.

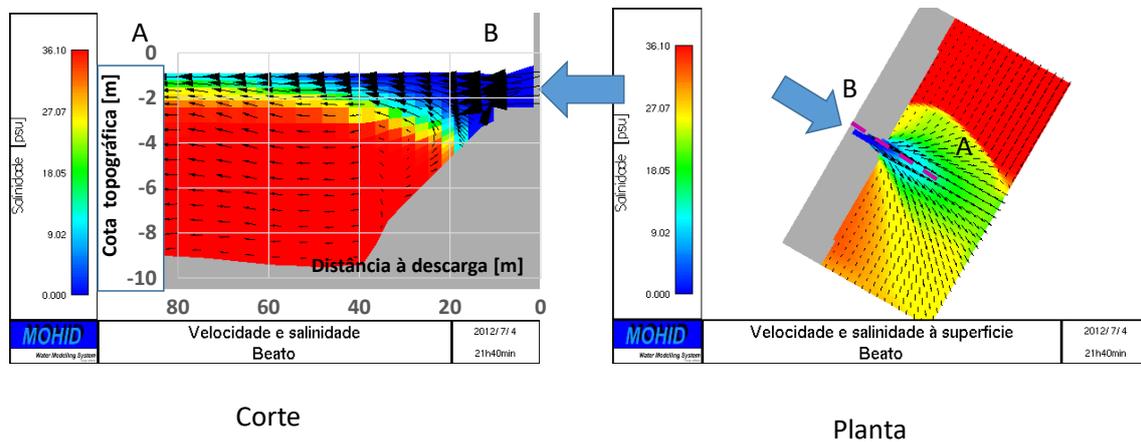


Figura 22 - Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma do Beato para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga superficial. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: painel esquerdo - corte na direção normal ao cais, painel direito - campo superficial.

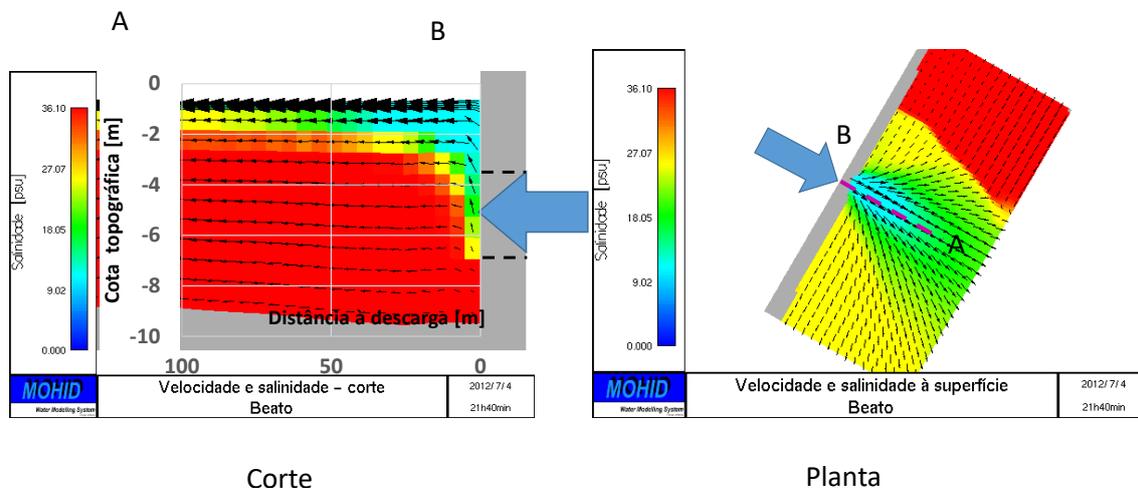


Figura 23 - Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma do Beato para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga em profundidade. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: painel esquerdo - corte na direção normal ao cais, painel direito - campo superficial.

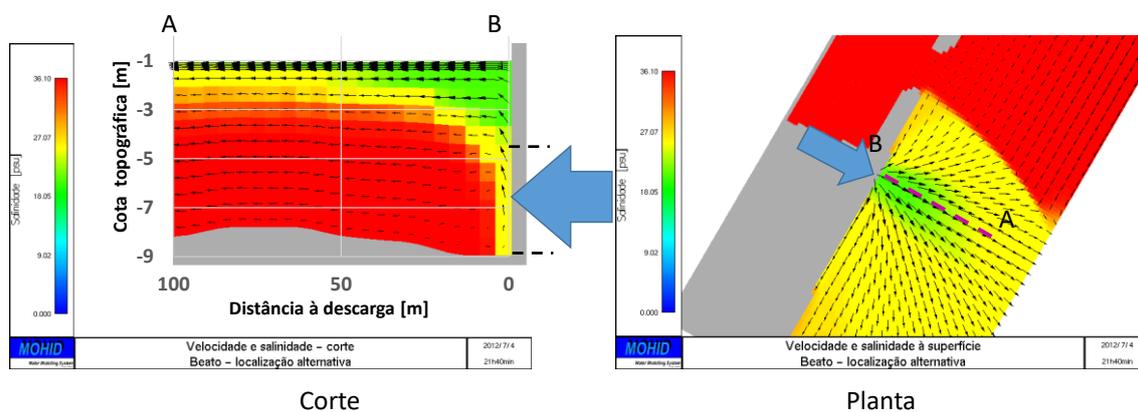


Figura 24 - Estrutura 3D (salinidade e velocidades) da pluma do Beato (localização alternativa) para um cenário de caudal de cheia frequente para uma situação de maré-viva. Descarga em profundidade. Os resultados são para um instante em que o caudal máximo é atingido: painel esquerdo - corte na direção normal ao cais, painel direito - campo superficial.

## 4.2 Velocidade à superfície – campo próximo

Os resultados já apresentados mostram que as descargas de água pluvial em situações de cheia irão gerar intensificações significativas no campo de velocidades à superfície (aproximadamente no primeiro metro de coluna de água numa zona em que a coluna de água em média tem cerca de 10 m). De seguida é feita uma análise focada na

intensificação das correntes na zona próxima das plumas que intersectam as áreas próximas do cais.

#### 4.2.1 Santa Apolónia

No caso de Santa Apolónia para uma situação de caudal de cheia frequente (situação que ocorrerá em média 5 vezes ao ano), maré viva em baixa-mar, sem muro, o modelo apresenta velocidades perpendiculares à frente cais máximas da ordem de 1 a 1.5 m/s numa extensão de aproximadamente 100 m numa situação de maré viva em baixa-mar (Figura 25). Velocidades desta ordem de grandeza são comuns na direção paralela ao cais, mas não na direção perpendicular. Por exemplo, numa situação de vazante de maré viva o meio recetor apresenta velocidades da ordem de 1 m/s (Figura 26).

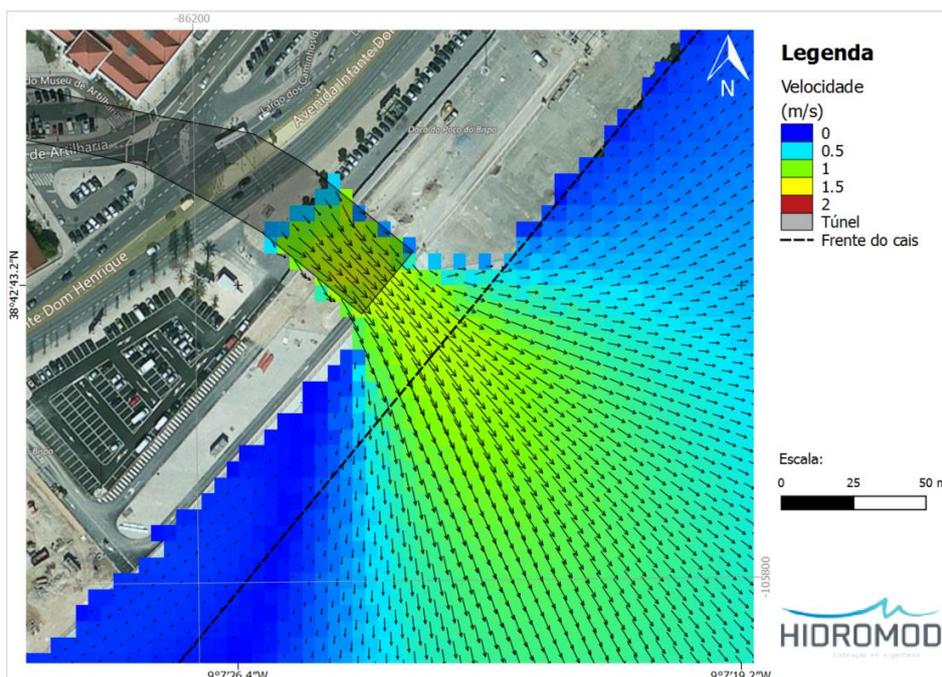


Figura 25 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) sem muro para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

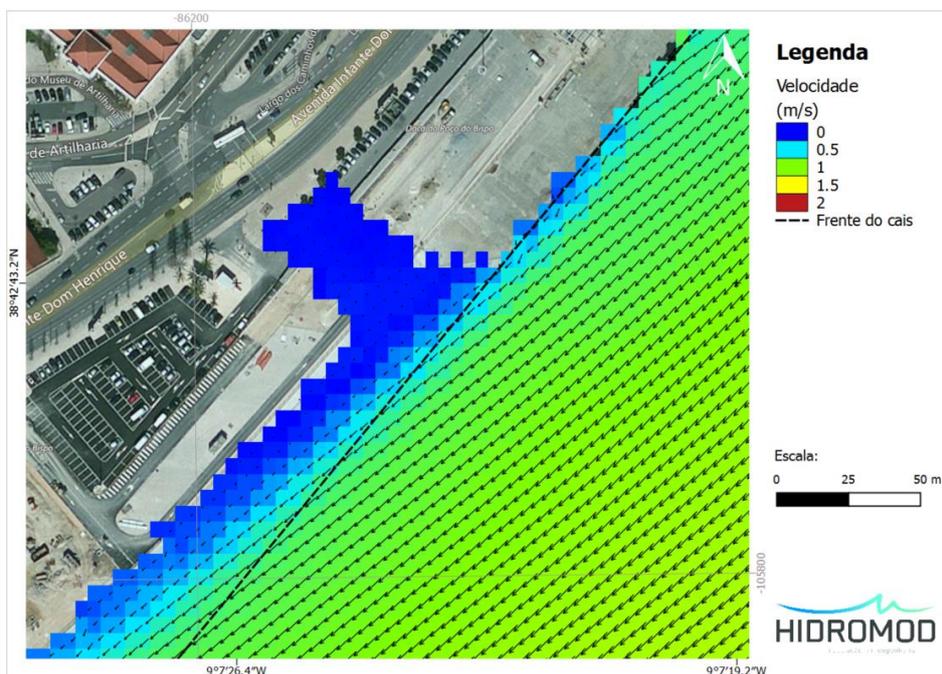


Figura 26 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) sem descarga (situação de referência), maré viva/meio da vazante.

O muro ao defletir a pluma para sudoeste diminui, em aproximadamente 30%, a intensidade da componente perpendicular ao cais (Figura 27). Sem muro o eixo da pluma intersecta a frente cais na perpendicular. O muro obriga a que o eixo da pluma tenha um ângulo de aproximadamente 45° relativamente à frente cais. A intensidade perpendicular diminui mas a extensão de cais que passa a ser afetada pela pluma aumenta para aproximadamente o dobro (Figura 27).

A situação de maré viva em baixa-mar é a mais desfavorável do ponto de vista do impacte das plumas sobre o campo de velocidades porque é a que apresenta um gradiente de níveis (descarga vs meio recetor) mais elevado e consequentemente velocidades na zona de descarga mais intensas.

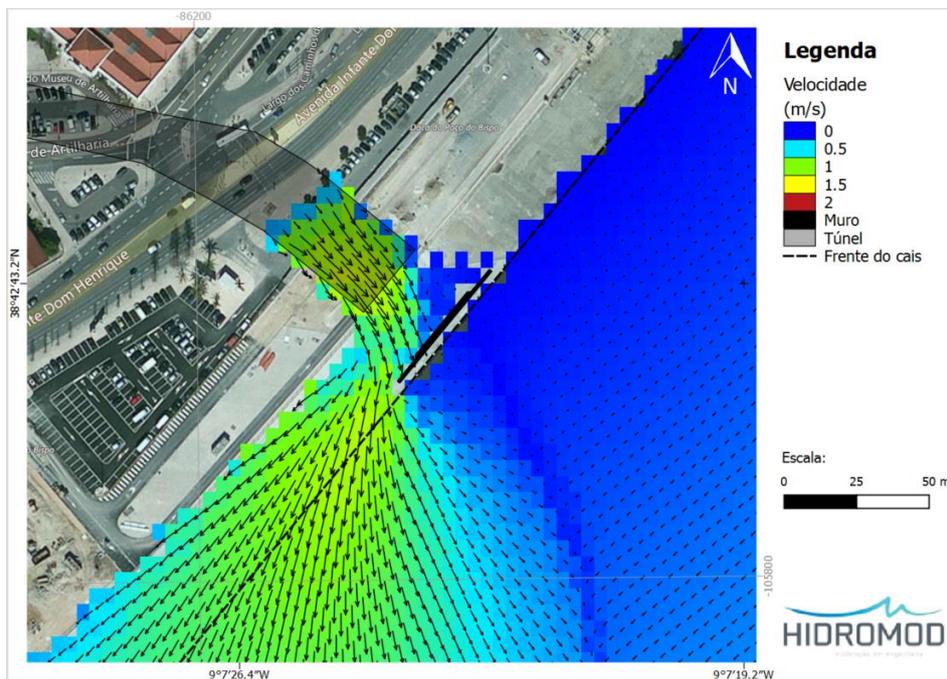
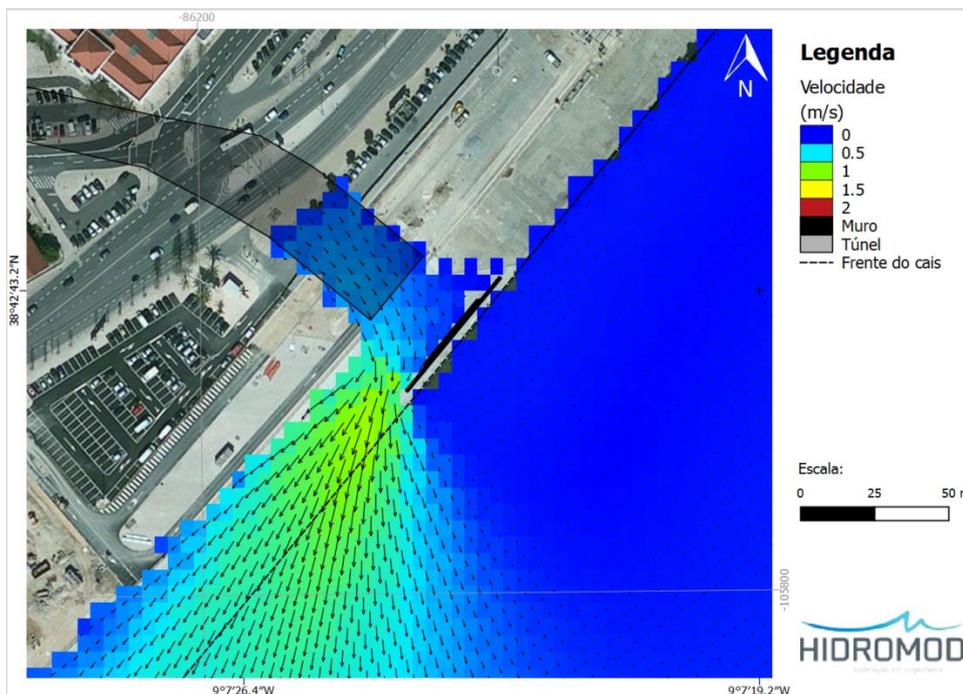


Figura 27- Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

Para uma situação de maré morta em preia-mar, com muro, as velocidades ao longo da frente cais têm a mesma direção que o cenário em maré viva mas a intensidade da corrente superficial é inferior, da ordem de 0.5 a 1 m/s (Figura 28).



*Figura 28 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.*

A direção do campo de correntes à superfície para os cenários de um caudal de cheia com um período de retorno de 100 anos (Figura 29, Figura 30 e Figura 31) é semelhante aos cenários de caudal de cheia frequente (Figura 25, Figura 27 e Figura 28). No entanto, as intensidades das correntes são aproximadamente o dobro na zona de interseção da pluma com a frente cais.

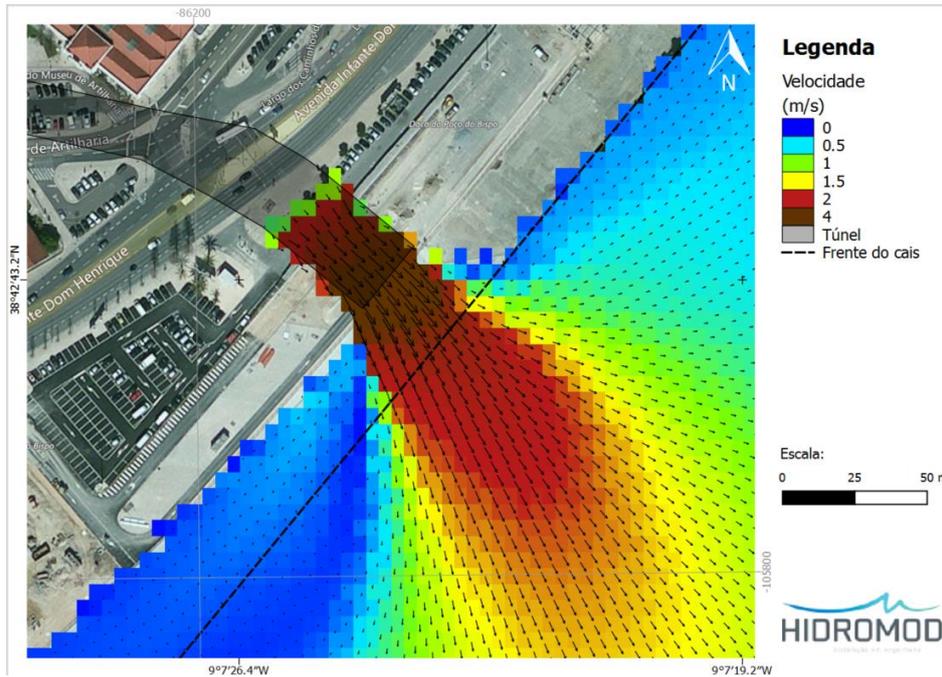


Figura 29 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) sem muro para uma situação de caudal de cheia com um período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

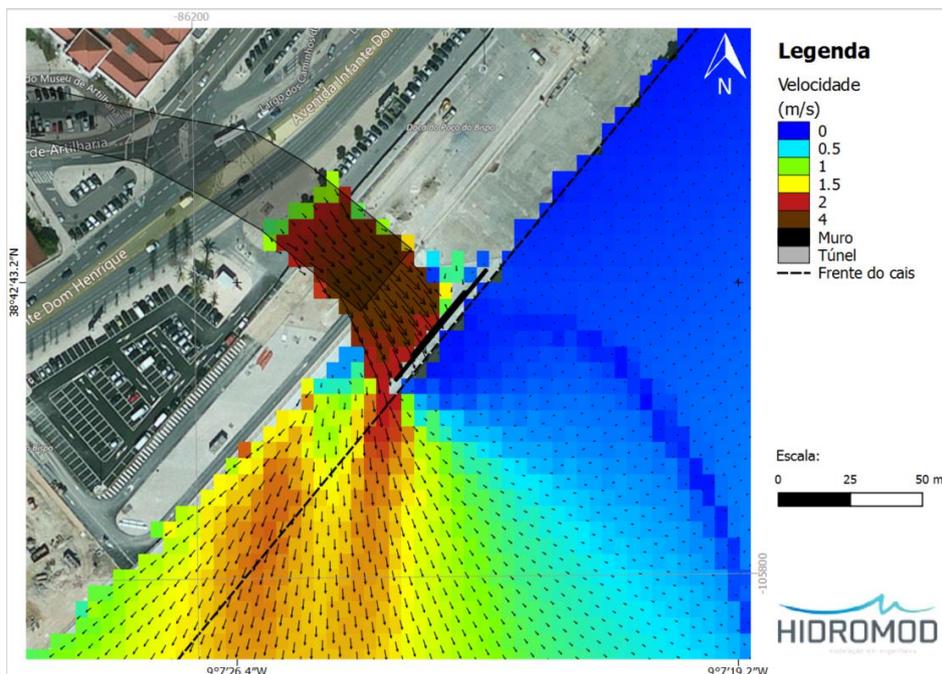


Figura 30 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia com um período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

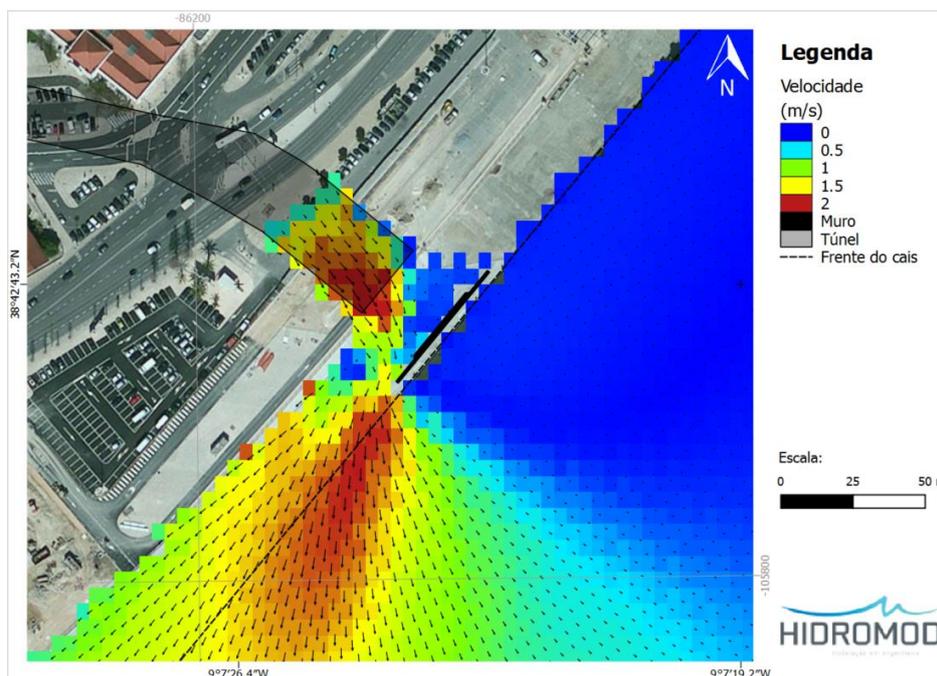


Figura 31 - Campo de velocidades superficial para Santa Apolónia (vetores a cada 5 m) com muro para uma situação de caudal de cheia com um período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.

#### 4.2.2 Beato

No cenário de caudal de cheia frequente com descarga à superfície em maré viva baixa-mar as velocidades perpendiculares à frente cais podem atingir valores máximos de 2 m/s à superfície ao longo de uma extensão de cerca de 40 m (Figura 32). A descarga em profundidade permite diminuir esta velocidade ao longo da frente cais para 1 m/s mas mantém-se a direção da velocidade, perpendicular à frente cais, e a área afetada pela pluma (Figura 33). Nas zonas de maiores velocidades não existem diferenças significativas para a descarga em profundidade em maré viva baixa-mar (Figura 33) e maré morta em preia-mar (Figura 34).

De acordo com as indicações do projeto, a segunda localização considera apenas o cenário de descarga em profundidade. Os resultados para a segunda localização (Figura 35 e Figura 36) são semelhantes aos resultados obtidos para a primeira localização, tanto em termos de direção como intensidade (Figura 33, Figura 34).

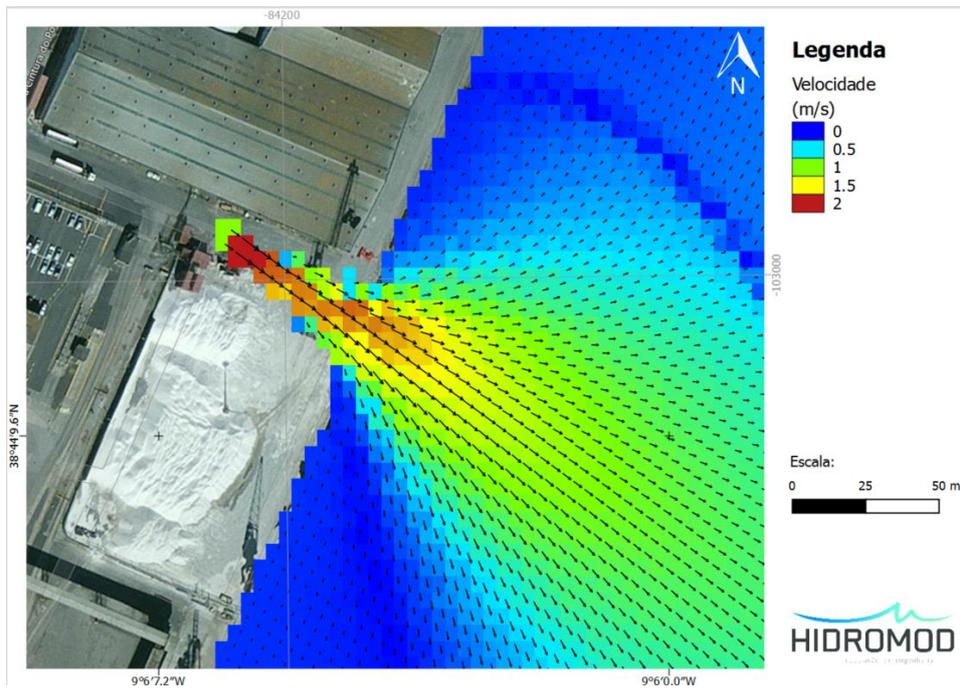


Figura 32 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga à superfície para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

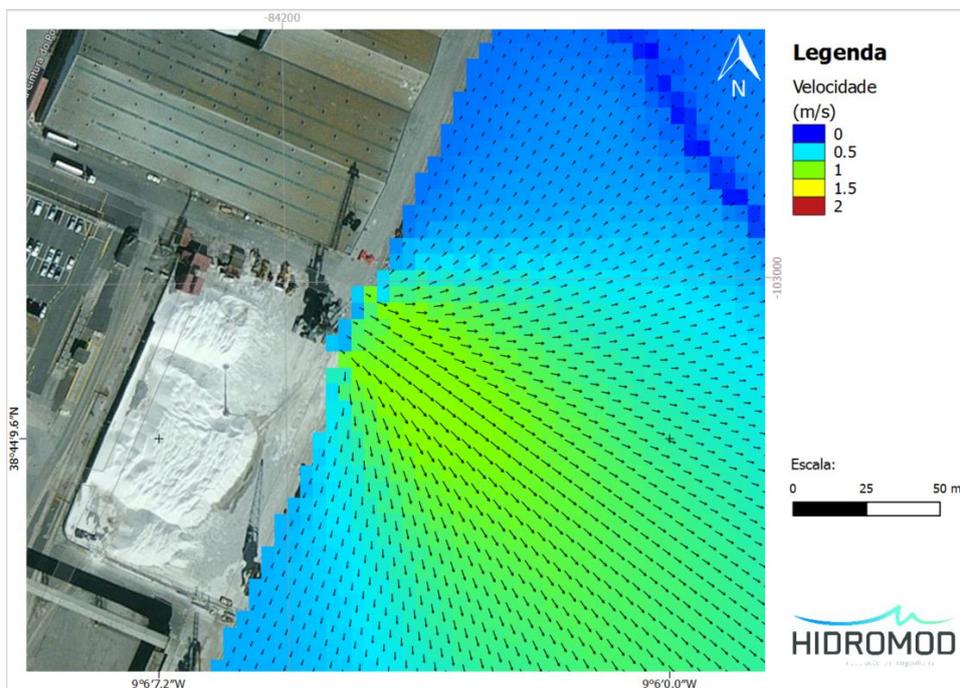


Figura 33 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

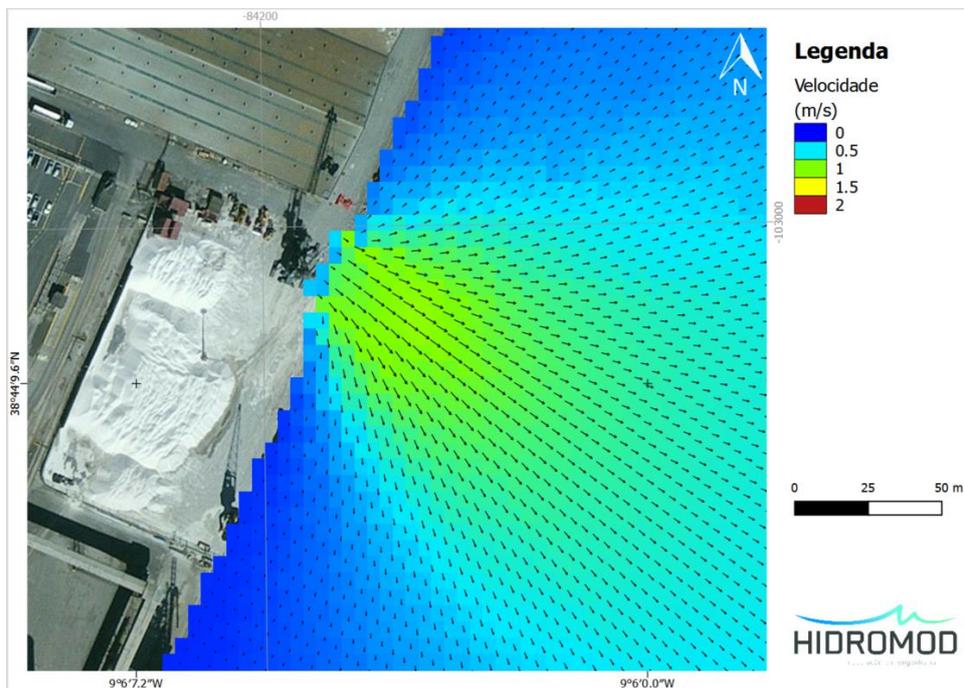


Figura 34 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.

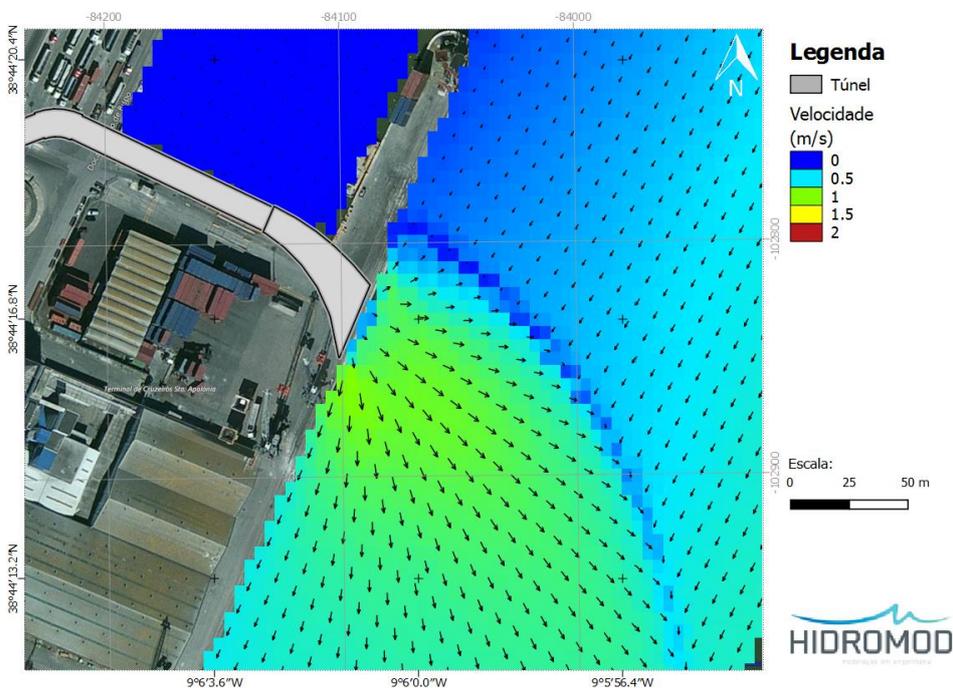
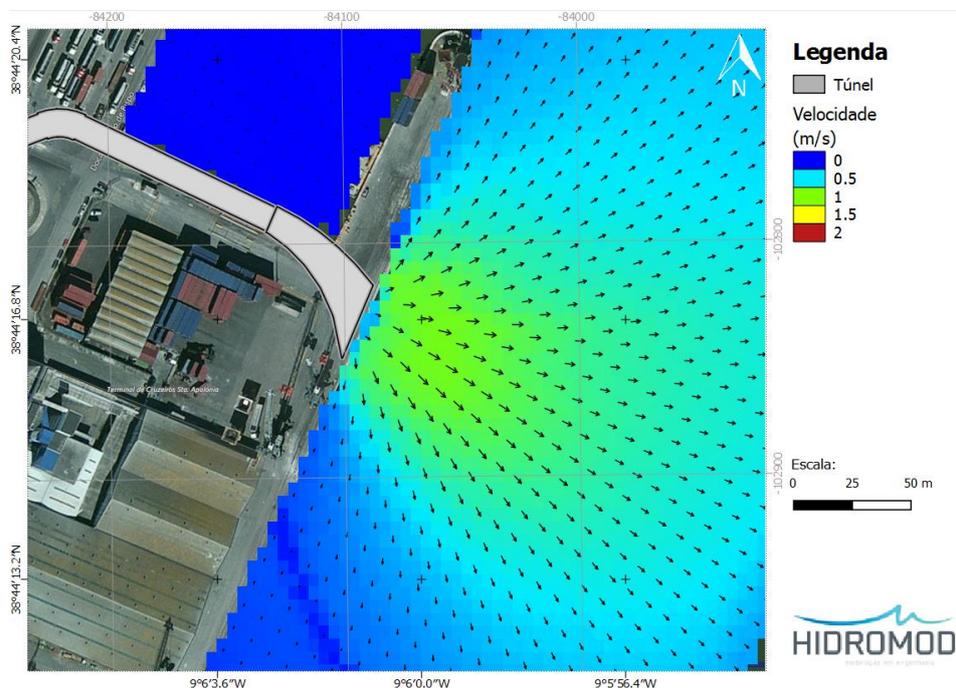


Figura 35 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.



*Figura 36 - Campo de velocidades superficiais para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia frequente, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.*

Na primeira localização testada para o cenário de caudal de cheia, com um período de retorno de 100 anos e descarga à superfície, as velocidades perpendiculares à frente cais podem atingir valores máximos superiores a 2 m/s (Figura 37). No caso da descarga em profundidade existe uma redução da velocidade perpendicular junto à frente cais induzida pela pluma de água pluvial. Neste caso o modelo apresenta velocidades junto à frente cais 1 a 1.5 m/s para a situação de maré viva baixa-mar (Figura 38). No entanto, esta redução é menor para a situação e maré-morta preia-mar. O meio recetor para a situação de maré viva apresenta velocidades mais intensas o que induz uma maior mistura da pluma e logo velocidades à superfície menores que a situação de maré morta (maré viva - Figura 38 e maré morta - Figura 39).

O mesmo padrão é observado nos resultados obtidos para a segunda localização testada. No entanto, não existem diferenças significativas entre maré viva (Figura 40) e maré morta (Figura 41).

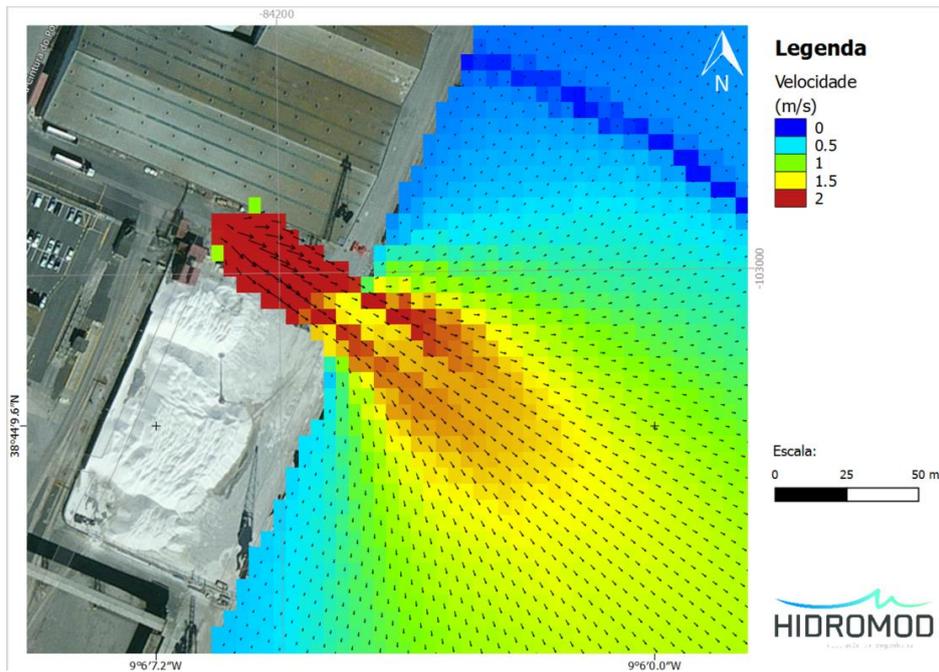


Figura 37 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga à superfície para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

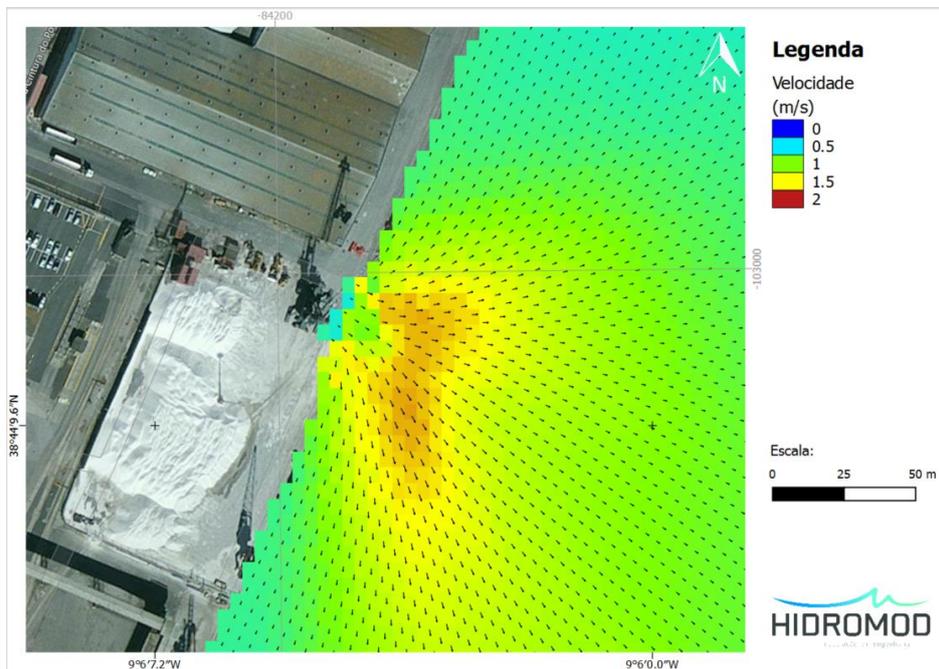


Figura 38 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

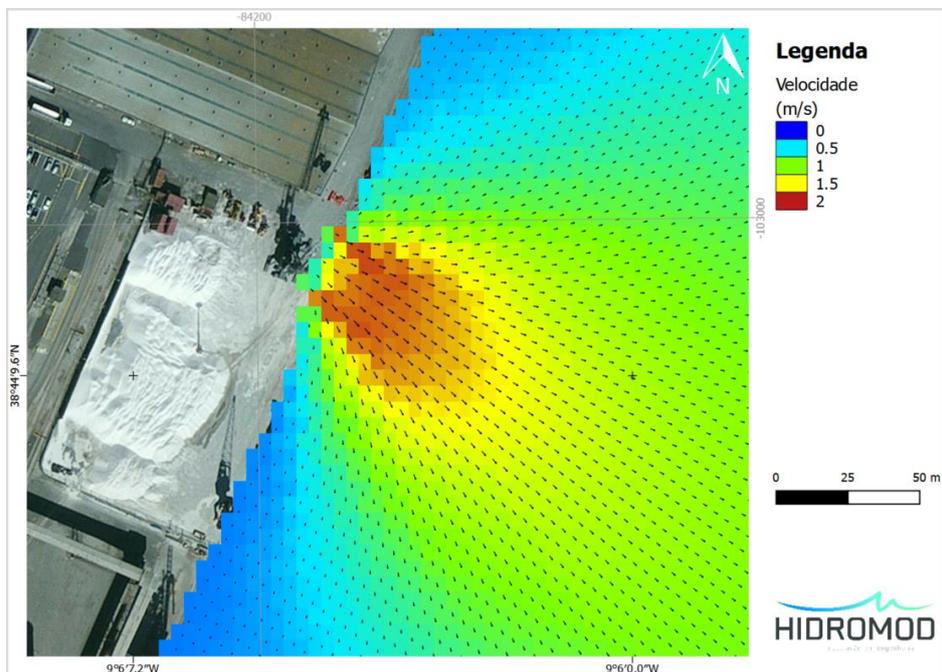


Figura 39 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m) descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.

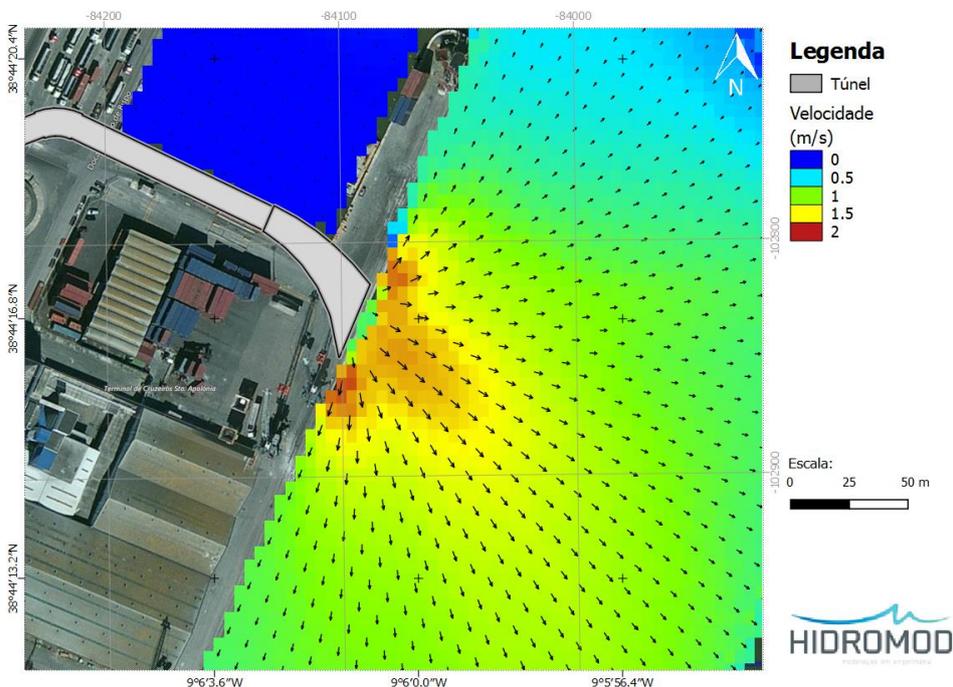


Figura 40 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré viva/baixa-mar.

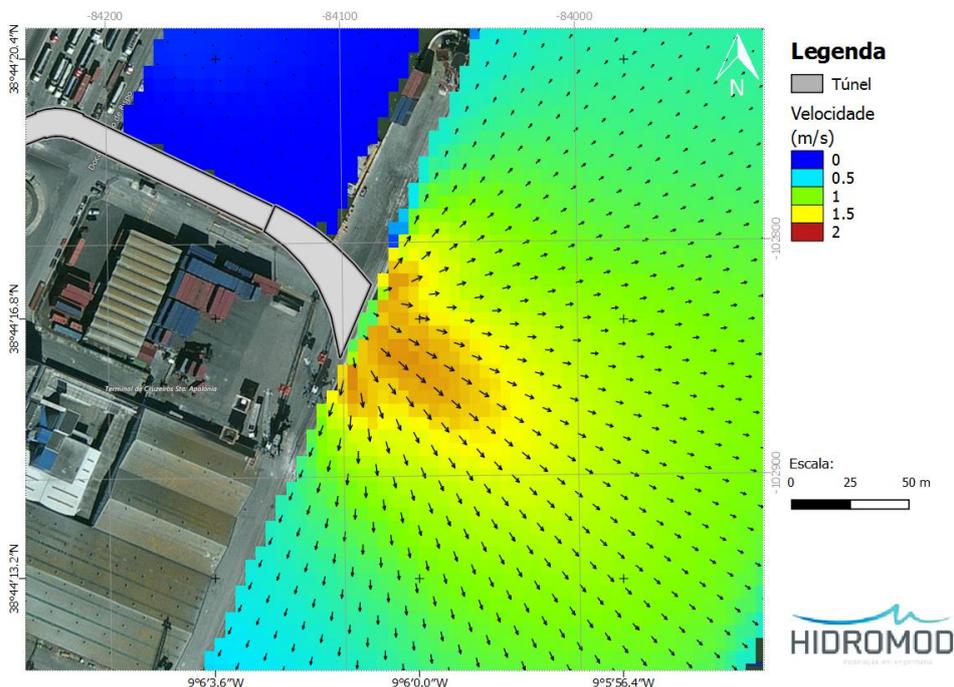


Figura 41 - Campo de velocidades superficial para o Beato (vetores a cada 5 m), localização alternativa, descarga em profundidade para uma situação de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, instante de caudal pluvial máximo, maré morta/preia-mar.

### 4.3 Transporte de sedimentos

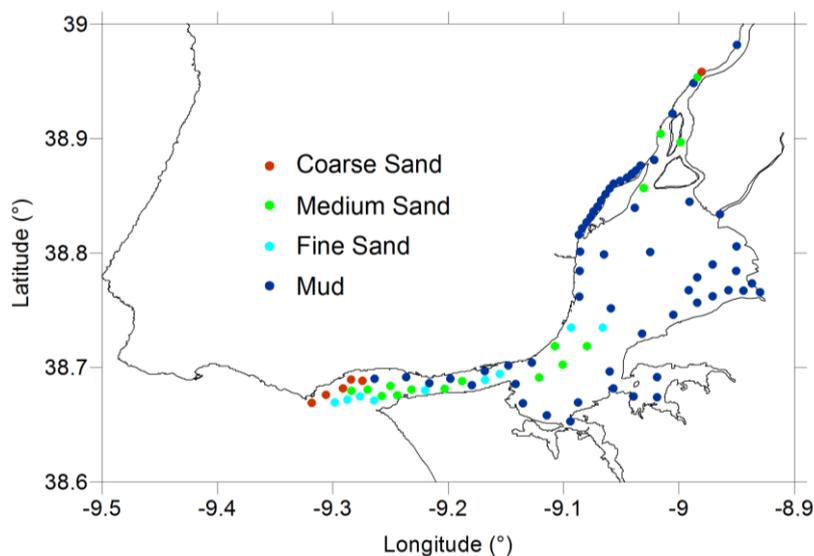
Os túneis serão dimensionados de forma a evitar que haja descarga de sólidos de granulometria grosseira (e.g. areias, cascalho) associado às plumas. Estão previstas estruturas hidráulicas que têm por objetivo reter material grosseiro ao longo dos túneis.

Estima-se que a concentração de sólidos suspensos totais (SST) da descarga de água pluvial será da ordem de 100 mg/l. Medidas feitas no estuário em duas estações próximas das zonas de interesse mostram que no meio recetor a concentração de SST varia entre 20 e 150 mg/l (Franz et al., 2014). Pode-se concluir que a turbidez do efluente é da ordem de grandeza da observada no meio recetor logo pode-se considerar que não existe impacte significativo em termos de turbidez.

Devido ao efeito da força de impulsão sobre a pluma esta tem um impacte reduzido na tensão de corte do fundo e conseqüentemente nos processos de erosão/deposição. De forma a avaliar o impacte das plumas sobre o transporte de sedimentos no meio

recetor foi simulado, para cada cenário de cheia, a evolução da batimetria relativamente ao cenário de referência.

Na zona mais afastada da frente cais (mais profundas e de maior velocidade) o fundo é de areia fina a média (Canário et al., 2007 - Figura 42). Os sedimentos junto ao cais tenderão a ser lodos de espessura e consistência muito variáveis (Perestelo, 1971). No entanto, como se trata de uma zona muito dinâmica e onde ocorrem de forma persistente trabalhos de dragagens, assumiu-se neste trabalho que em algumas zonas poderá haver areias finas ou uma mistura de areias finas e lodos.



*Figura 42 - Amostras de sedimentos em vários pontos do estuário (Franz, 2016 adaptado de Canário et al., 2007).*

As áreas de interesse (Santa Apolónia e Beato) são zonas portuárias mantidas com trabalhos de dragagem. Impactes que induzam nesta zona processos de assoreamento e consequentemente diminuição da coluna de água disponível devem ser avaliados.

Os resultados do modelo hidrodinâmico mostram que tanto em termos médios como na análise de extremos, em todos os cenários, ocorre um acréscimo da tensão de corte no fundo na zona de influência da pluma relativamente ao cenário de referência. Caso o fundo seja apenas lodos haverá erosão localizada que irá ressuspender sedimentos finos na coluna de água, que tenderão a ser rapidamente dispersos por uma área extensa devido às fortes velocidades do meio recetor. A capacidade de dispersão do

meio recetor juntamente com baixas velocidades de queda (~ 10 m/dia) dos sedimentos finos implica que não haverá zonas de assoreamento localizado. Os processos de erosão induzidos pelas plumas de origem pluvial são benéficos para esta zona porque os fundos são mantidos à custa de dragagens persistentes.

Caso o fundo seja de areia fina também existe erosão localizada na área das correntes mais intensas da pluma mas devido às velocidades de sedimentação mais intensas ocorrerá uma sedimentação também localizada.

A evolução batimétrica resulta de um balanço de massa dos fluxos de sedimentos. No cálculo do fluxo de transporte de sedimentos considerou-se a granulometria de uma areia fina, por ser a situação mais desfavorável. Neste trabalho os fluxos de sedimentos foram calculados recorrendo à formulação proposta por Van Rijn (2007). Esta formulação calcula o transporte em suspensão e de *bedload* em função da velocidade de corte, da velocidade média da coluna de água e da granulometria do sedimento.

Mesmo considerando o leito como sendo de areia fina, as alterações batimétricas previstas pelo modelo são muito reduzidas relativamente à situação de referência. No caso dos cenários de caudal de cheia frequente as alterações são inferiores a 1 cm tanto no Beato como em Santa Apolónia, podendo considerar-se que o fundo não é perturbado para situações frequentes de caudal de cheia.

Nos cenários de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, as alterações de fundo continuam a ser diminutas, da ordem dos centímetros e muito localizadas no espaço. Em termos de assoreamento, os cenários mais desfavoráveis são os de maré viva com muro (Santa Apolónia) e descarga em profundidade (Beato). Estes cenários ao permitirem uma maior mistura da pluma na vertical acabam por perturbar mais o fundo. Em Santa Apolónia as alterações batimétricas ficam restringidas entre o muro e a descarga ou seja não afetam a zona navegável (Figura 43). O modelo estima volumes de assoreamento da ordem de 200 m<sup>3</sup>. No caso do Beato é formado um pequeno delta para a primeira localização testada (~50 m<sup>2</sup>) com alterações do fundo inferiores a 50 cm em que os volumes de assoreamento são inferiores a 100 m<sup>3</sup> (Figura 44). No caso da segunda localização testada para o Beato as alterações máximas de fundo são inferiores a 1 cm tanto em termos de assoreamento como de erosão (Figura 45). Nos

outros cenários de cheia com período de retorno de 100 anos (maré morta e descarga à superfície) as alterações de fundo são inferiores a 10 cm na zona navegável (descarga à superfície em maré-viva: Beato - Figura 46 e Santa Apolónia - Figura 47).

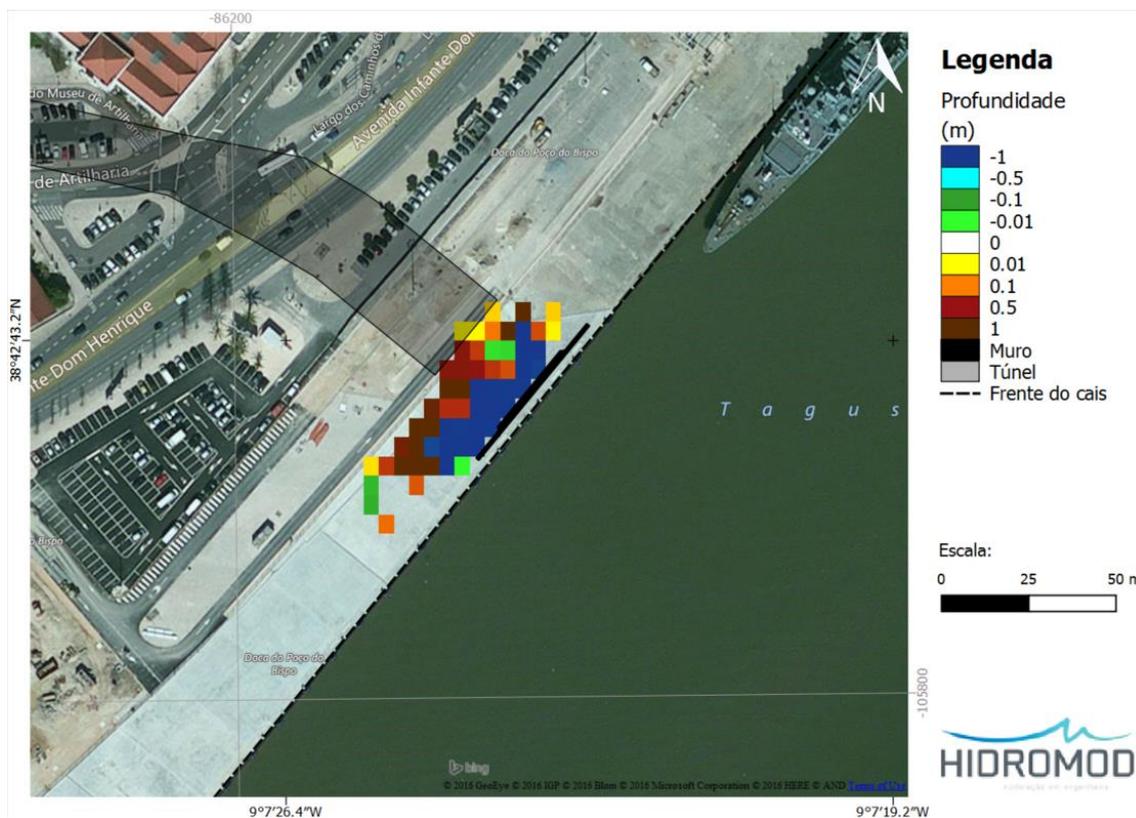


Figura 43 - Santa Apolónia, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga com muro.

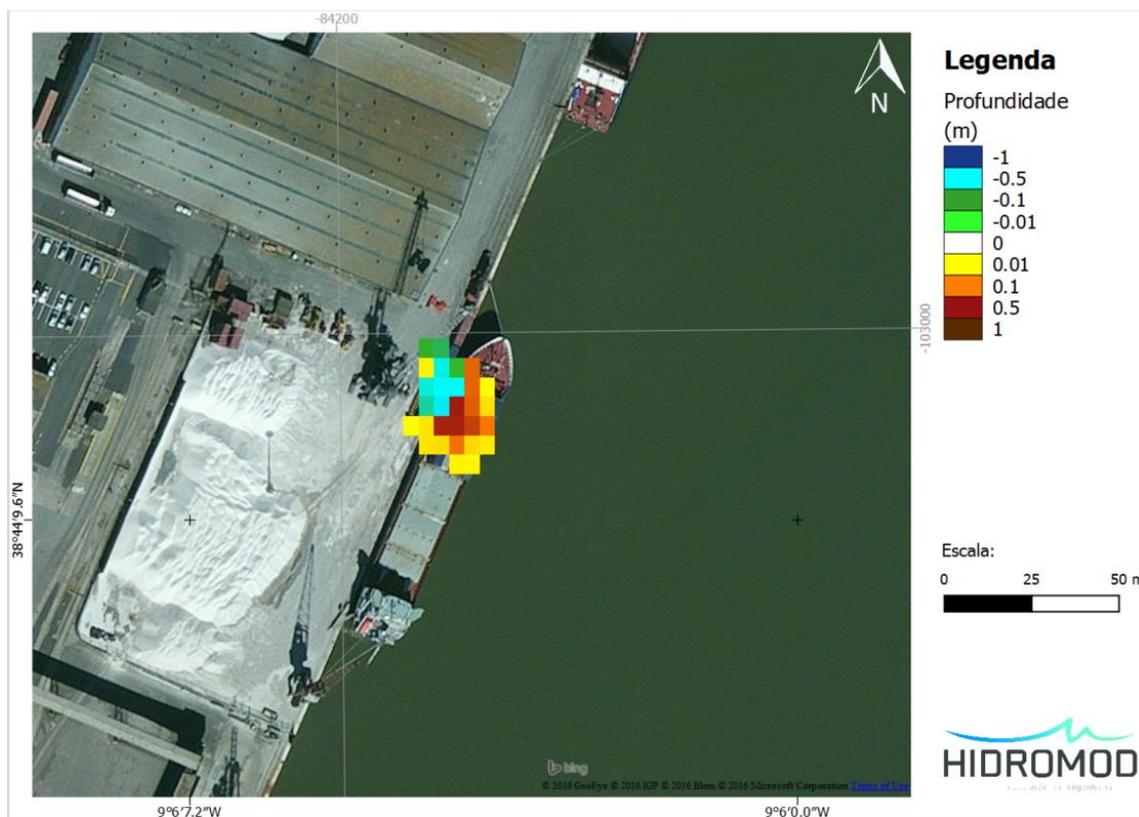


Figura 44 - Beato, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga em profundidade.

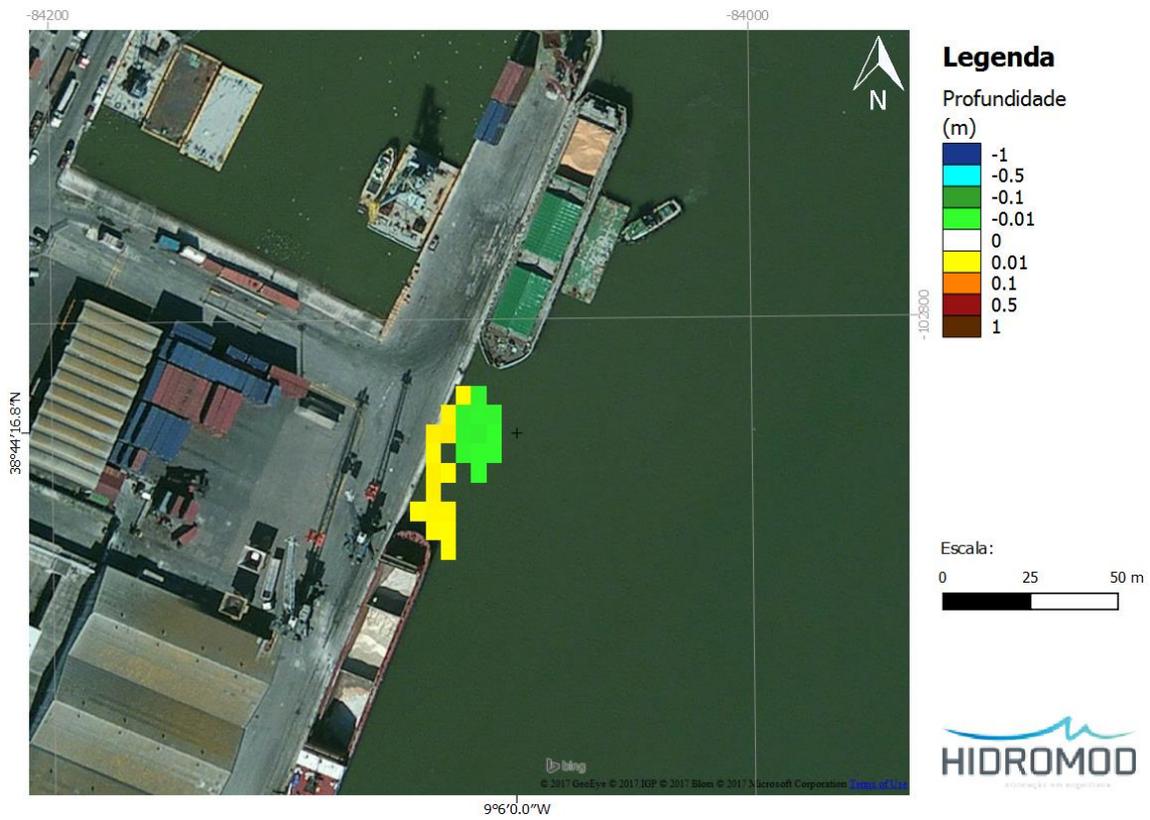


Figura 45 - Beato, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva, localização alternativa e descarga em profundidade.

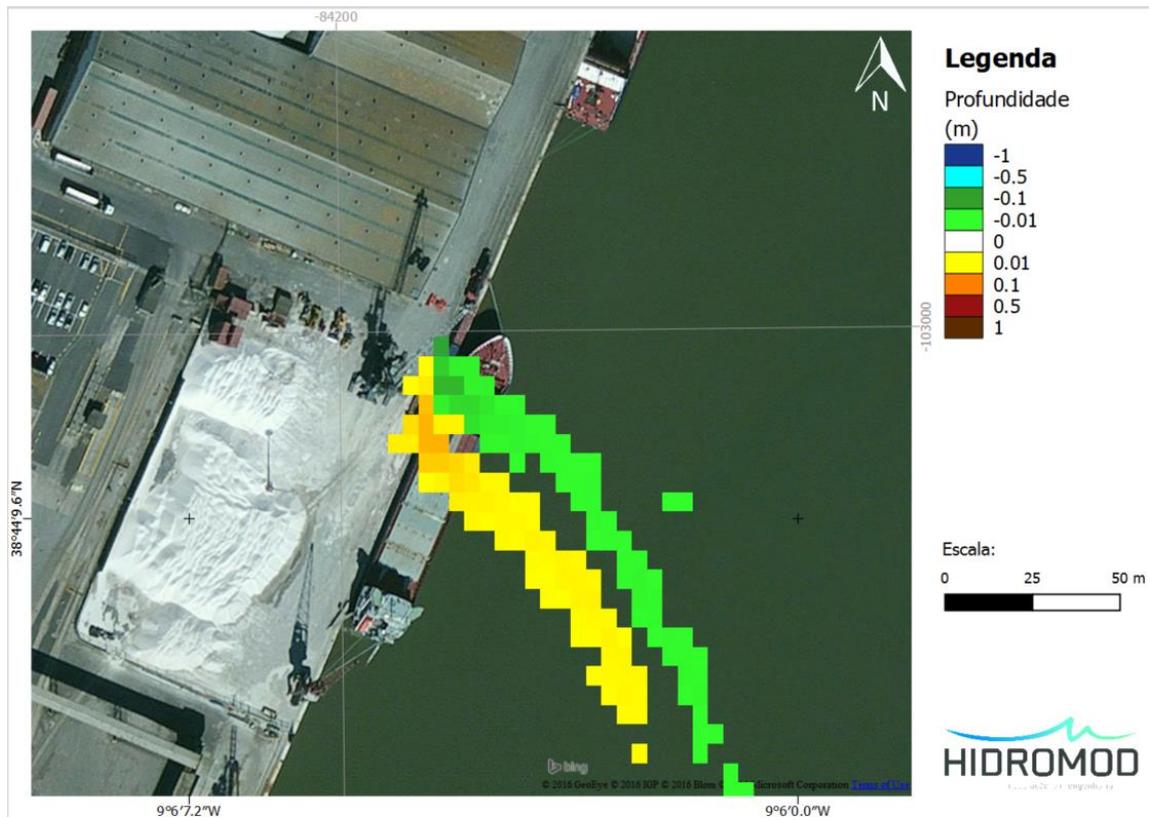


Figura 46 - Beato, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga à superfície.



Figura 47 - Santa Apolónia, variação batimétrica relativa para um cenário de caudal de cheia com período de retorno de 100 anos, maré viva e descarga sem muro.

#### 4.4 Dispersão de poluentes

Com o objetivo de avaliar a capacidade do meio recetor em dispersar poluentes dissolvidos de origem pluvial foi simulada a descarga de uma propriedade conservativa genérica (evolui apenas devido a processos de transporte). Assumiu-se que o meio recetor inicialmente tem uma concentração nula desta propriedade genérica e a descarga de água pluvial uma concentração de  $10^6$ . Uma diluição de 10 corresponde a um decaimento na concentração do poluente de uma ordem de grandeza apenas devido a processos de transporte (ou dispersão).

A partir da análise dos resultados é possível estimar a capacidade de diluição do meio recetor de um poluente que possa estar associado às descargas pluviais. A diluição em cada célula pode-se definir da seguinte forma para cada instante no tempo:

$$D_{i,j,k}(t) = \frac{C_D}{C_{i,j,k}(t)}$$

$D_{i,j,k}(t)$  - diluição na célula de cálculo  $i,j,k$  no instante  $t$ ;

$C_{i,j,k}(t)$  - concentração da propriedade conservativa na célula de cálculo  $i,j,k$  no instante  $t$ ;

$C_D$  - concentração da propriedade conservativa na descarga.

Apenas são apresentados os cenários de caudal frequente de cheia porque se considera que os eventos com período de retorno de 100 anos não são representativos do ponto de vista da qualidade da água.

Numa primeira fase da análise dos resultados é caracterizada a área máxima que poderá potencialmente ser afetada do ponto de vista da qualidade da água. Esta análise é feita com base nos campos de diluição mínima simulados para cada cenário. A partir destes campos é possível estimar o decaimento mínimo que um poluente com origem na descarga irá ter, devido apenas à dispersão ou seja desprezando processos de fonte e poço (e.g. mortalidade). A base desta análise serão os resultados dos modelos 3D focados no campo afastado (passo espacial de 25 m).

A análise feita na primeira fase tem um carácter instantâneo. Numa segunda fase é feita uma análise da persistência temporal do impacte sobre a qualidade da água. Neste caso será feita uma análise da persistência temporal dos valores de diluição. Neste caso a base da análise serão resultados dos modelos 3D focados no campo próximo (passo espacial de 5 m).

#### **4.4.1 Dimensão da pluma**

Em termos de qualidade da água considera-se a contaminação fecal como o poluente com maior impacte sobre o meio recetor. Segundo Selvakumar e Borst (2006) as

descargas de águas pluviais de origem urbana apresentam concentrações de coliformes fecais (indicador de contaminação fecal) que variam entre  $6 \times 10^3$  e  $2 \times 10^4$  CFU/100 mL. Não existe atualmente em Portugal legislação específica que estipule níveis de contaminação aceitáveis em zonas estuarinas com atividade portuária. A legislação relativamente a indicadores de contaminação fecal em águas de transição (e.g. estuários) está muito focada em zonas balneares<sup>2</sup> e de produção conquinícola. A actual legislação que regula a classificação dos corpos de águas é feita no âmbito da Diretiva Quadro da Água e tem apenas em consideração a qualidade química e qualidade ecológica da água, não utilizando a microbiologia como parâmetro. No entanto, existem *guidelines* antigas, propostas pela APA, de classificação dos cursos de água superficiais, de acordo com as suas características de qualidade para usos múltiplos, que consideravam a água com boa qualidade se 85% das amostras de coliformes fecais recolhidas ao longo do ano apresentasse concentrações inferiores a 2.000 CFU/100 mL<sup>3</sup>. Assume-se neste trabalho este limite como um indicador de boa qualidade do meio recetor.

Com base nos valores apresentados optou-se por considerar, na análise da dimensão da pluma, um limite máximo de diluição de 10. Assume-se que a partir desta diluição o impacte da pluma não é relevante. Tem que se sublinhar que se trata de um limite conservativo pelas seguintes razões:

- o limite considerado permite que em 15% do tempo os valores do meio recetor sejam superiores a 2.000 CFU/100 mL;
- o limite de diluição considerado corresponde a um decaimento da concentração de um poluente em uma ordem de grandeza. Este decaimento é atingido sem considerar processos de mortalidade (termos de poço);
- não existe atualmente um limite legal de contaminação fecal estabelecido para zonas portuárias.

---

<sup>2</sup> Directive BWD 2006/7/EC, available at

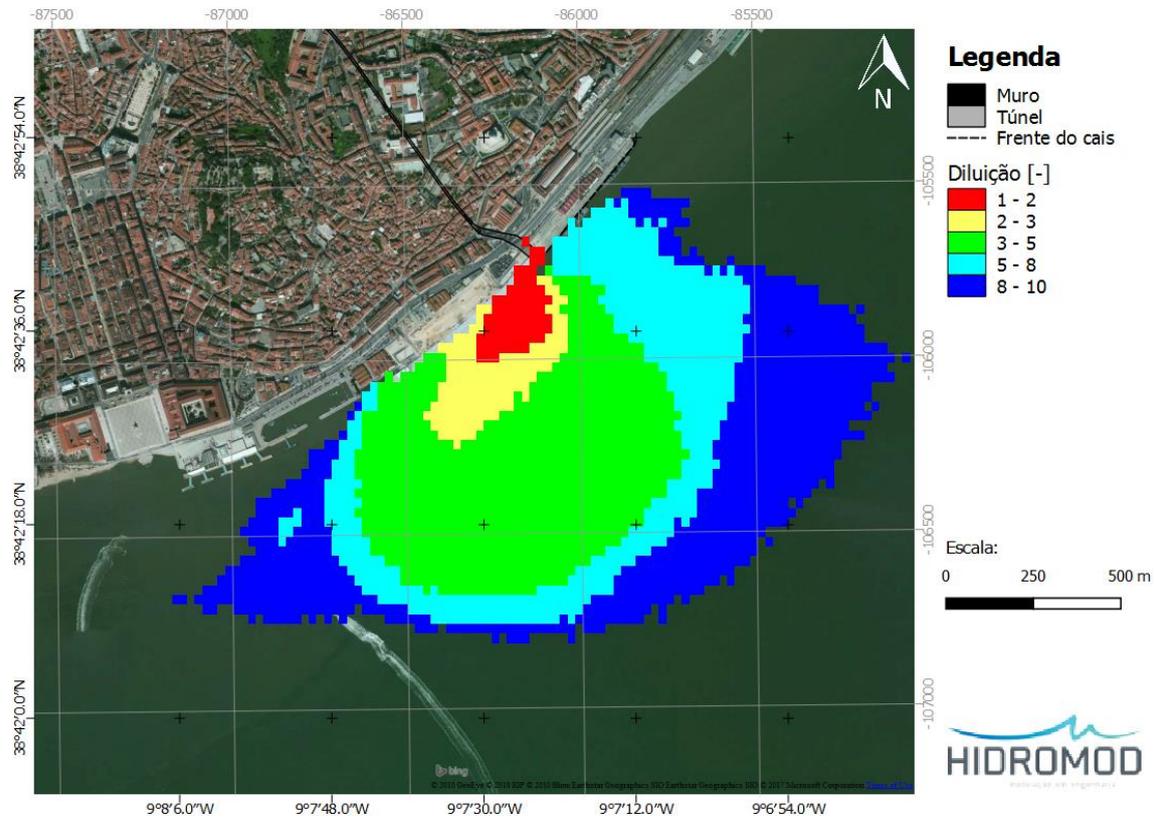
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:064:0037:0051:EN:PDF>

<sup>3</sup> [http://snirh.apambiente.pt/snirh/\\_dadossintese/qualidadeanuario/boletim/tabela\\_classes.php](http://snirh.apambiente.pt/snirh/_dadossintese/qualidadeanuario/boletim/tabela_classes.php)

Outro aspeto que é importante realçar é que o impacte da pluma está restringido à superfície. Até cerca de 20 m de distância da descarga ocorrem processos de mistura vertical intensos (Figura 20 a Figura 24). Dentro desta zona, toda a coluna de água ou uma percentagem significativa da mesma poderá sofrer o um impacte da descarga de água pluvial. No entanto, a partir do limite dos 20 m, em todos os cenários, a pluma estabiliza à superfície por ação das forças de impulsão e mantém-se com uma espessura de aproximadamente de 1 a 2 m em toda a zona de interesse (com diluição menor ou igual a 10).

#### **4.4.1.1 Santa Apolónia**

Em Santa Apolónia no cenário de descarga com muro as plumas associadas a cheias frequentes poderão influenciar a qualidade da água de forma instantânea até cerca de 1.5 km para jusante e 700 m para montante e na perpendicular à margem (Figura 48 - maré viva/baixa mar e Figura 49 - maré morta/preia-mar). Induzindo a descarga à superfície uma dispersão na vertical menos eficiente no campo próximo, consequentemente apresenta valores de diluição menores na zona próxima da descarga (Figura 50). No entanto, a dispersão horizontal é tão intensa que à escala do campo afastado tende a gerar uma pluma de diluição mínima da mesma dimensão das já apresentadas mas mais simétrica na direção jusante-montante e com gradientes mais acentuados na zona limitrofe.



*Figura 48 - Diluição mínima à superfície para a pluma de Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré viva em baixa-mar.*

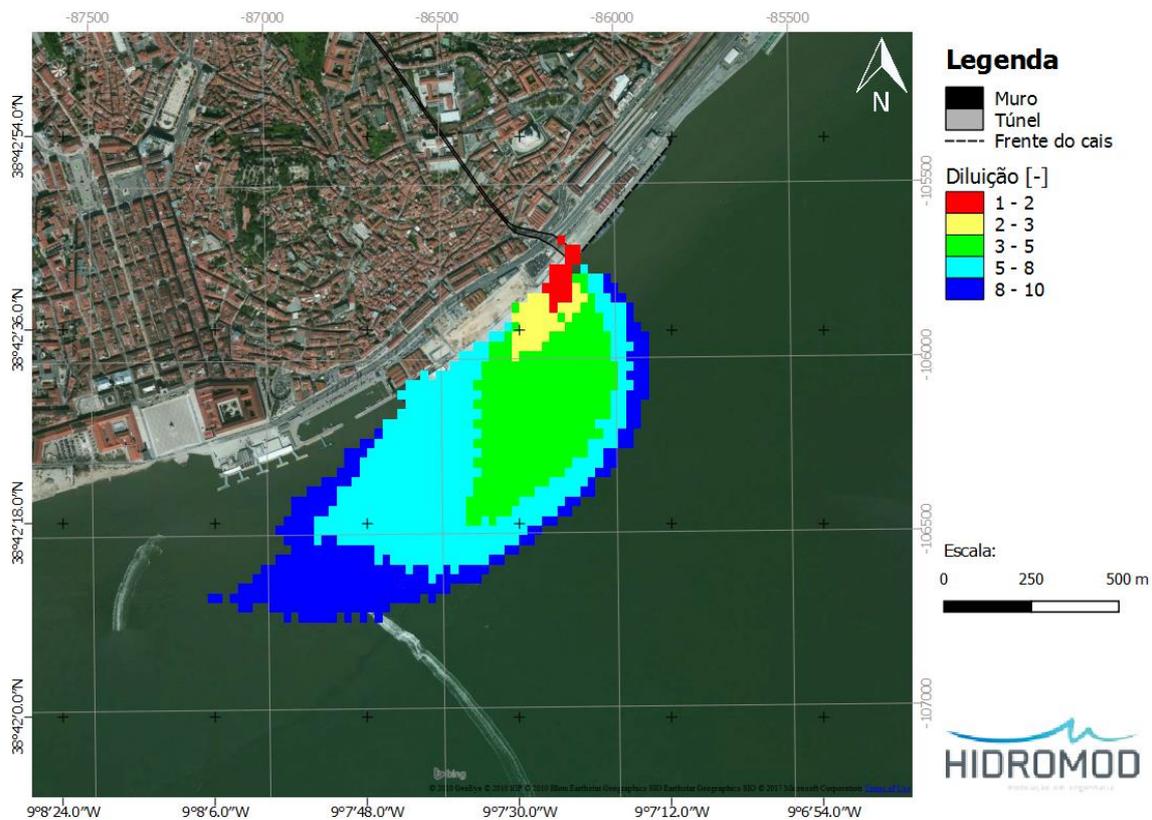
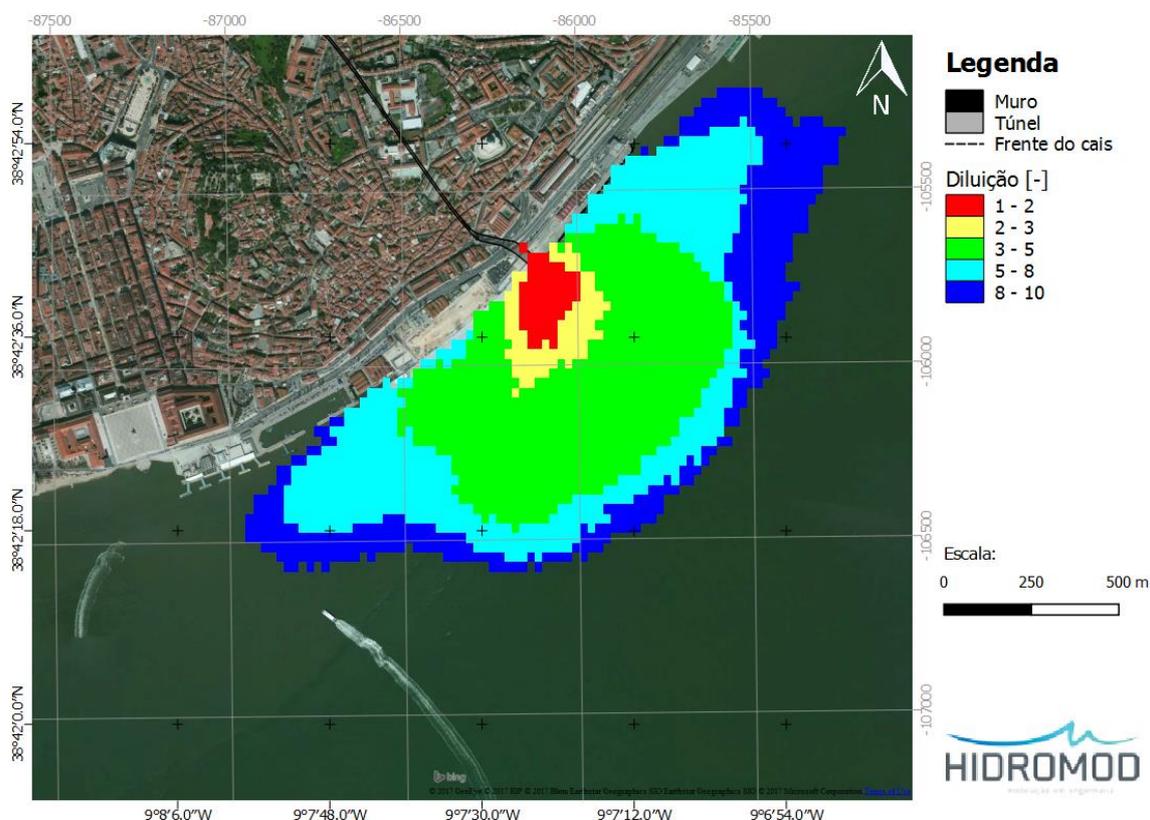


Figura 49 - Diluição mínima à superfície para a pluma de Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré morta em preia-mar.



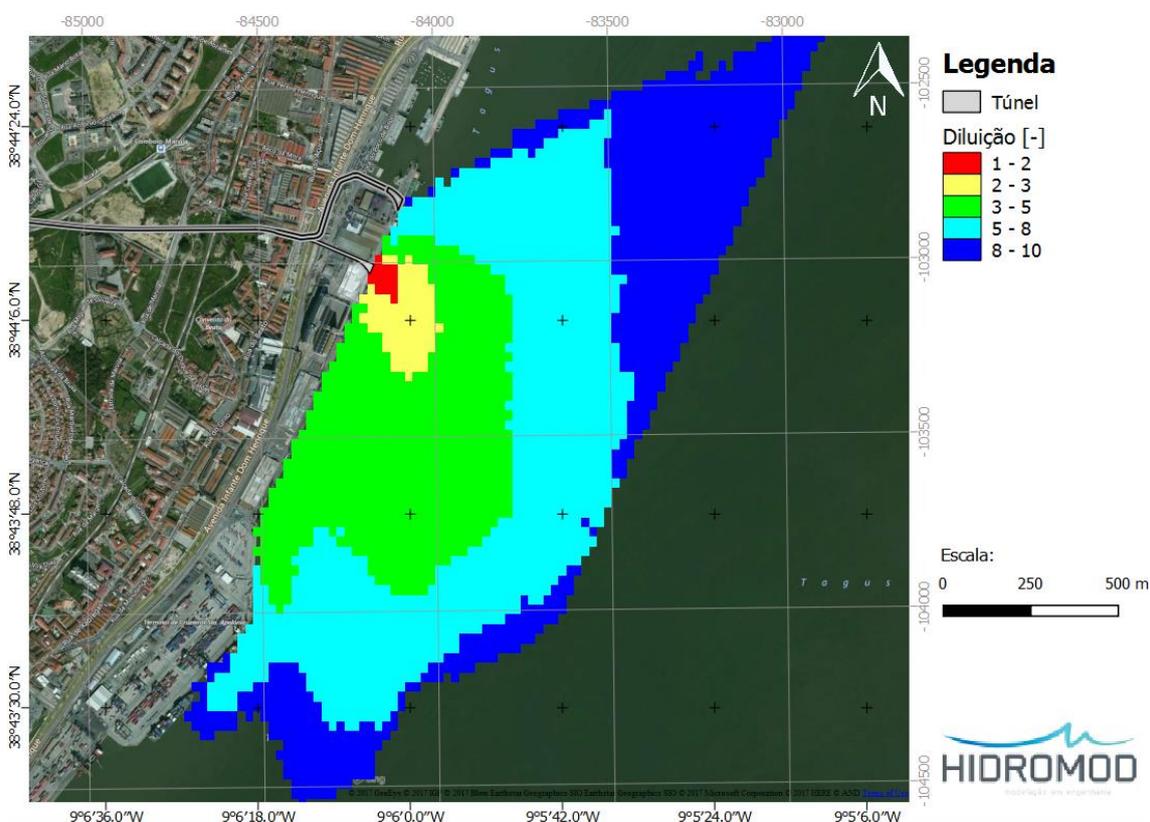
*Figura 50 - Diluição mínima à superfície para a pluma de Santa Apolónia para uma cheia frequente sem muro em maré viva em baixa-mar.*

#### 4.4.1.2 Beato

Os resultados dos campos de diluição mínima para o Beato mostram de forma clara a diferença entre emitir a descarga em profundidade e à superfície. A descarga em profundidade permite uma maior diluição no campo próximo e consequentemente concentrações mais baixas (diluições mais altas). A pluma para o cenário de descarga em profundidade em baixa-mar de maré viva apresenta uma dimensão maior mas com valores de diluição maiores próximo do ponto de descarga e gradientes mais esbatidos na zona limitrofe que a descarga à superfície (Figura 51 - descarga em profundidade, Figura 52 - descarga à superfície). No cenário de descarga em profundidade a pluma estende-se cerca de 1.5 km para montante/jusante e 700 m na direção perpendicular à margem. Os menores valores de diluição ocorrem na direção de jusante. A pluma

descarregada à superfície apresenta dimensões semelhantes mas estendendo-se apenas cerca de 700m para montante.

Existe também uma grande diferença entre a descarga em profundidade em baixa-mar maré viva e em preia-mar maré morta. Neste último caso, a pluma apresenta uma dimensão e valores de diluição na zona próxima bastante inferiores (Figura 53). Estas diferenças devem-se ao facto de que quando ocorre a descarga em preia-mar de maré morta a coluna de água do meio recetor é aproximadamente 2.5 m maior do que na situação de baixa-mar de maré viva. Consequentemente, a pluma descarregada tem no seu processo de ascensão mais 2.5 m de coluna de água para se misturar com o meio recetor o que faz com que o limite de diluição de 10 seja mais rapidamente atingido. Neste caso a pluma tem uma dimensão semelhante na direção perpendicular à margem e estendendo-se apenas 500 m para jusante e montante (Figura 53).



*Figura 51 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (primeira localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré viva em baixa-mar.*

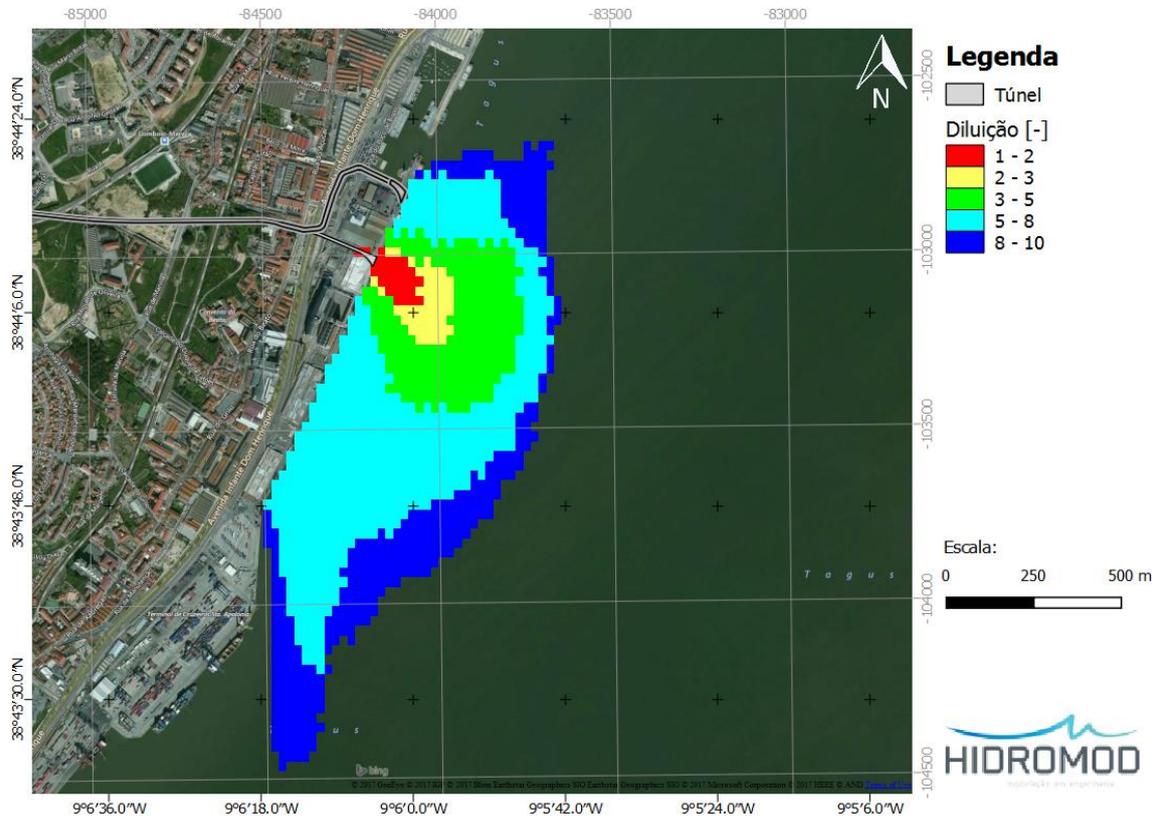
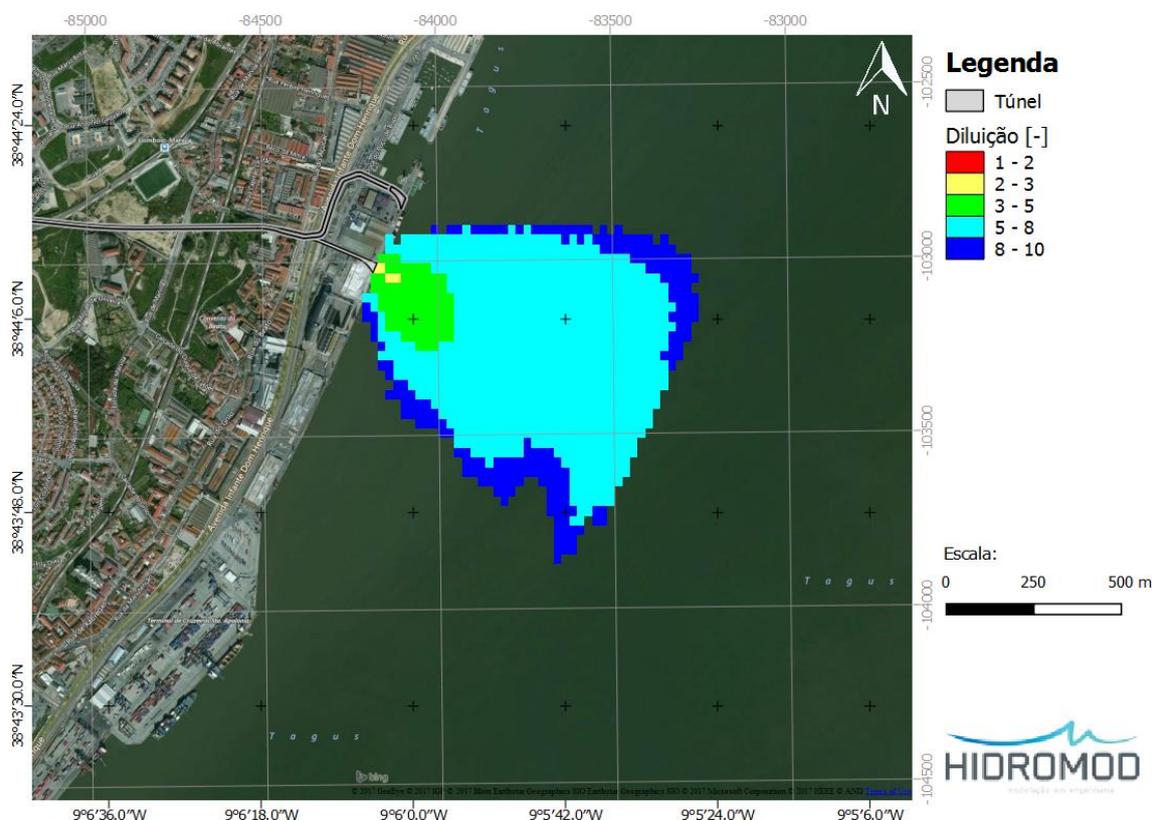


Figura 52 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (primeira localização testada) para uma cheia frequente descarga à superfície em maré viva em baixa-mar.



*Figura 53 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (primeira localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré morta em preia-mar.*

Na localização alternativa para o túnel do Beato a descarga em profundidade é feita a uma cota mais baixa que na primeira localização. Na localização alternativa a pluma tem para todos os cenários cerca de 1.5 m a mais de coluna de água para se misturar no processo de ascensão. Consequentemente, na localização alternativa a pluma apresenta uma dimensão inferior e valores de diluição superiores relativamente à primeira localização, tanto para o cenário de baixa-mar de maré viva (Figura 54) como de preia-mar de maré morta (Figura 55).

Dos resultados obtidos pode-se concluir que em termos de qualidade da água a descarga em profundidade é mais benéfica que a descarga à superfície. A descarga em profundidade na localização alternativa apresenta uma maior dispersão porque é feita a uma cota inferior. No caso da descarga em profundidade a intensidade com que a pluma é dispersa no meio recetor varia muito com a coluna de água ou seja varia ao longo do ciclo de maré. O impacte tende a ser mínimo em preia-mar e máximo em baixa-mar.

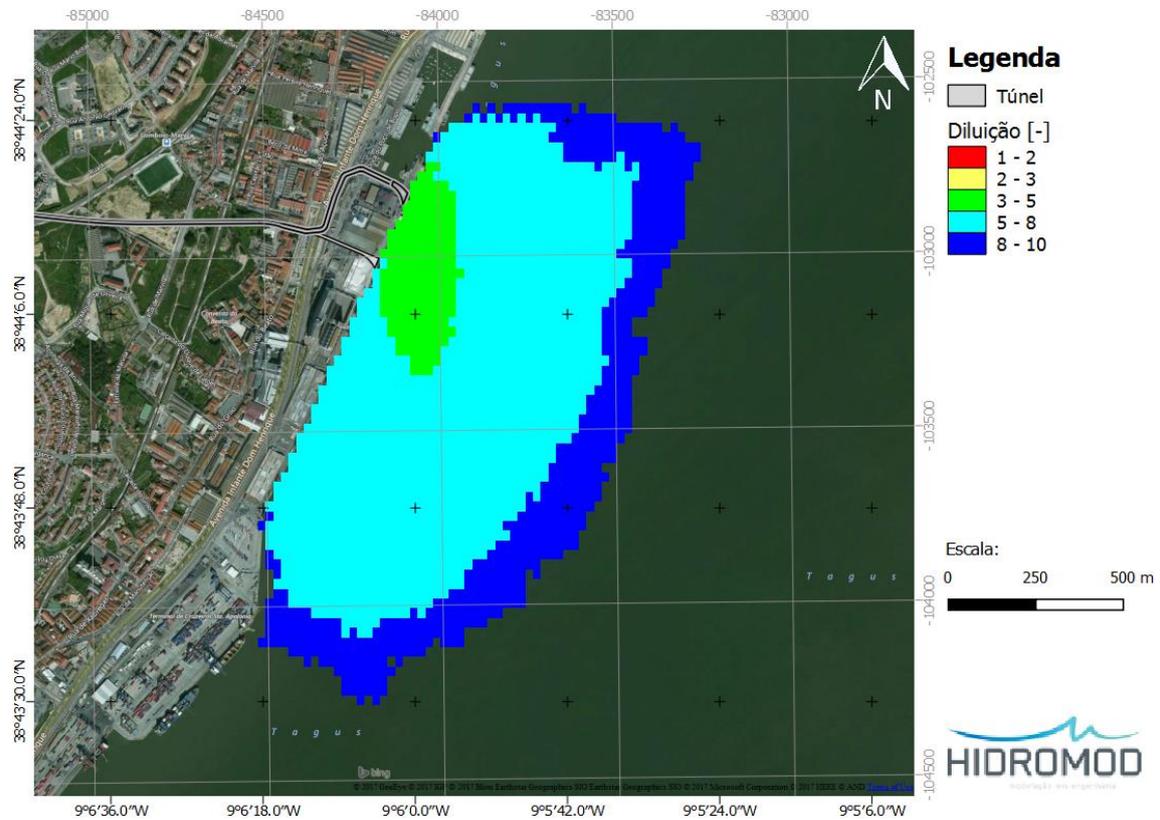


Figura 54 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (segunda localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré viva em baixa-mar.

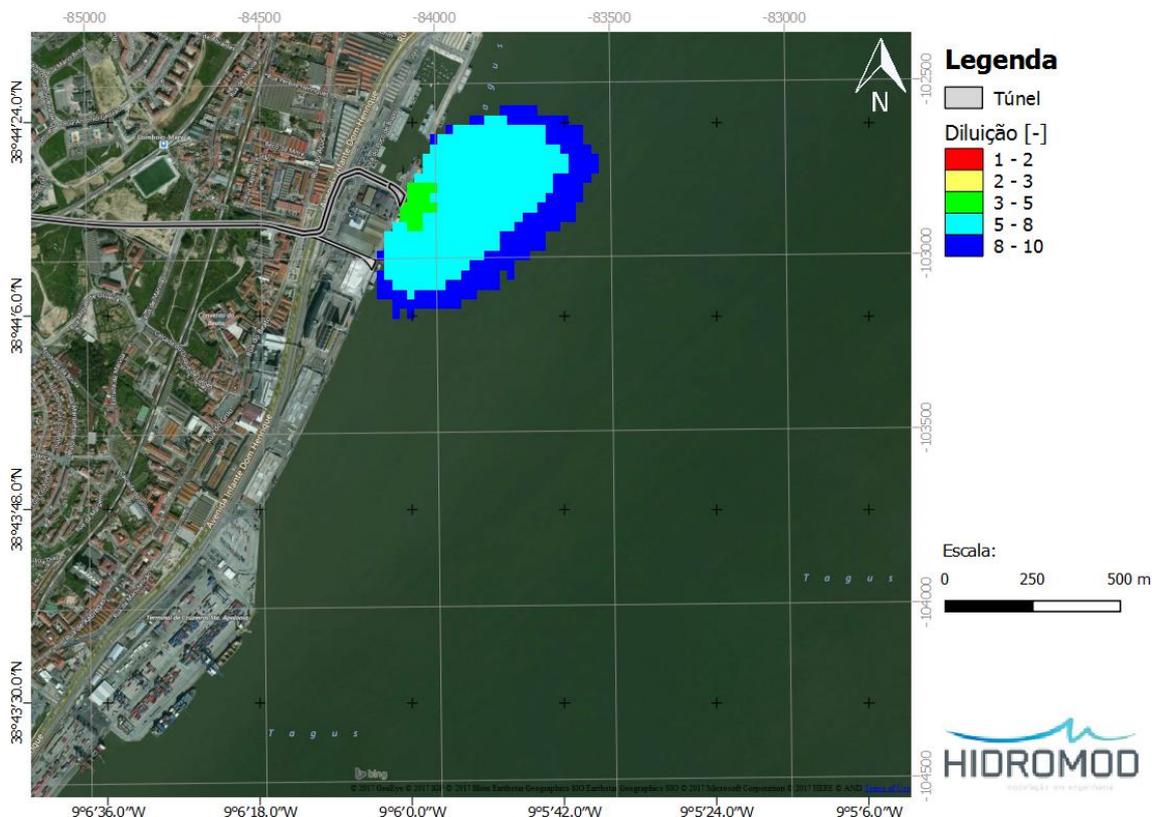


Figura 55 - Diluição mínima à superfície para a pluma do Beato (segunda localização testada) para uma cheia frequente descarga em profundidade em maré morta em preia-mar.

#### 4.4.2 Persistência temporal da pluma

Os resultados mostram que o sistema tem uma grande capacidade de dispersão para ambas as zonas de interesse. A forma de ilustrar com que persistência o meio recetor é capaz de dispersar as plumas associadas a eventos de cheia frequente, consistiu em calcular o tempo em que a diluição de cada célula é inferior a 10 (valor limite assumido na análise espacial anteriormente apresentada).

Os resultados apresentados mostram uma "pluma de tempo em horas" durante o qual a diluição é inferior a 10. Os eventos de cheia têm uma escala temporal de poucas horas, aproximadamente de 5 a 7 horas (Figura 6, Figura 7). Os resultados mostram que a persistência das plumas no meio recetor tende a ser sempre inferior a 7 h logo no campo próximo. O impacto das plumas tende rapidamente a ser dissipado pelo meio recetor.

#### 4.4.2.1 Santa Apolónia

No cenário de maré viva com descarga com muro o modelo mostra que a cerca de 300 m a jusante da descarga a diluição é inferior 10 apenas durante cerca de 3 horas. A montante e à mesma distância é inferior a 2 horas. No caso da maré morta a jusante a diluição é inferior a 10 durante cerca de 3 horas e a uma distância de aproximadamente 450 m. A montante, os resultados mostram uma diluição sempre superior a 10. A descarga sem muro para o cenário de baixa-mar em maré viva (Figura 58) apresenta valores máximos inferiores ao cenário com o muro (Figura 56). No cenário sem muro os períodos de diluição superior a 10 tendem a ser mais persistentes a montante da descarga.

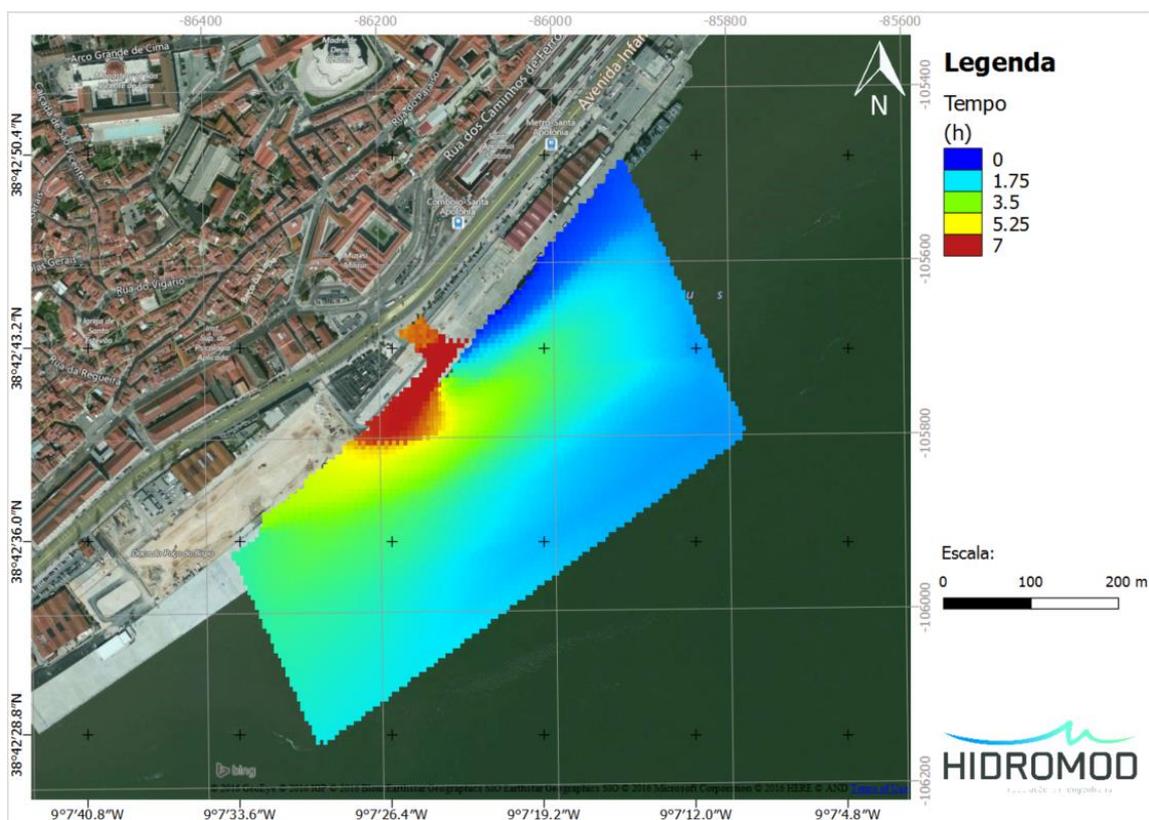


Figura 56 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré viva em baixa-mar.

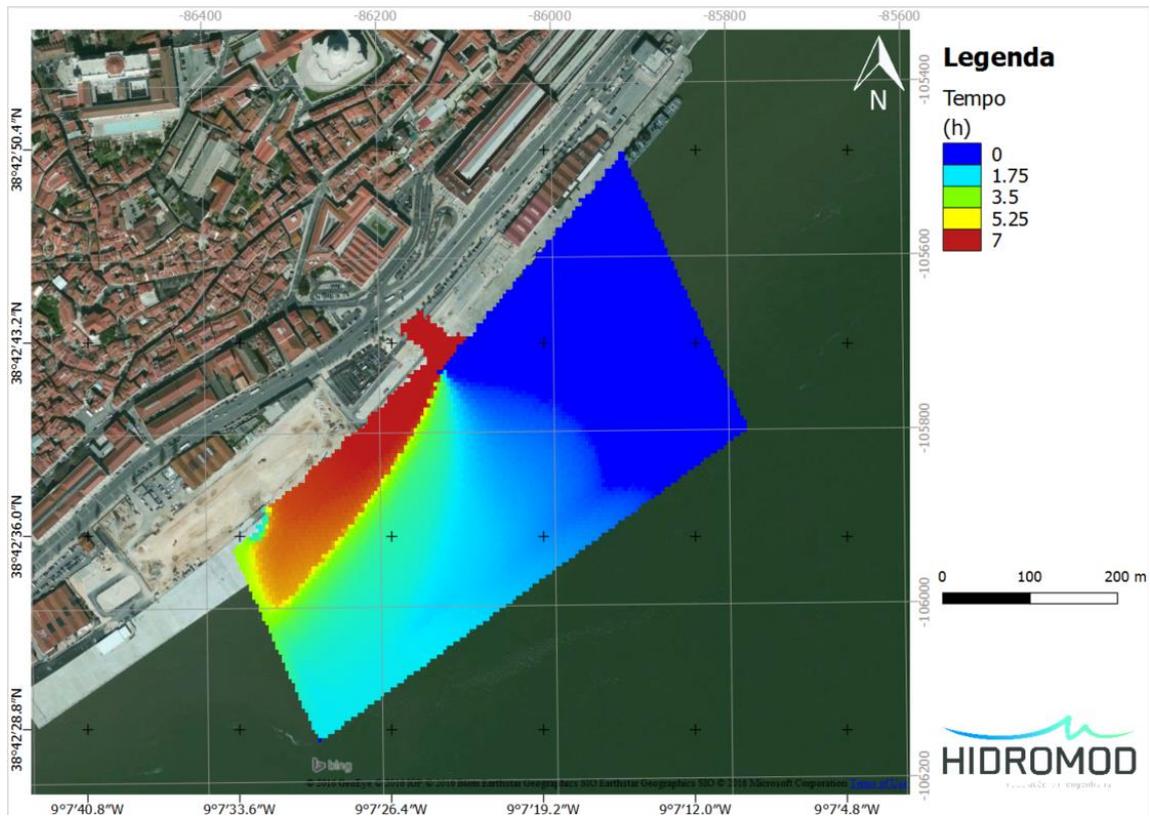


Figura 57 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para Santa Apolónia para uma cheia frequente com muro em maré morta em preia-mar.

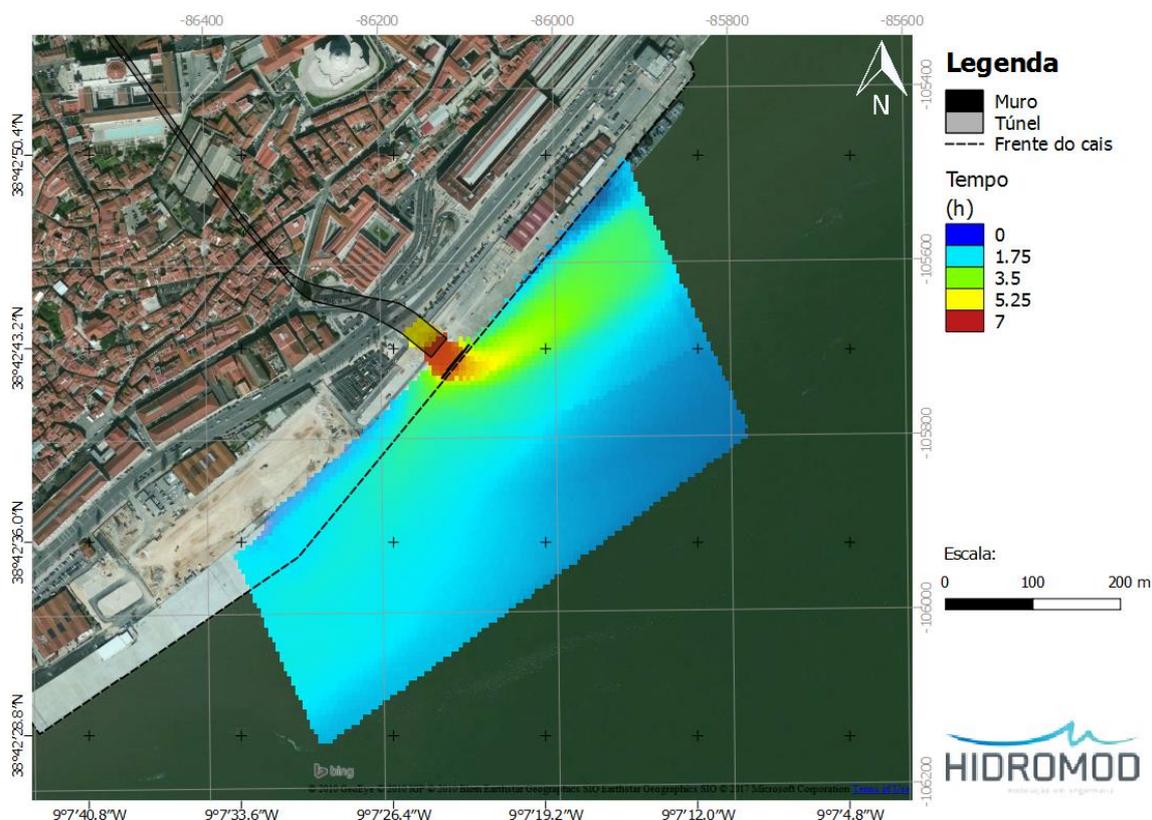


Figura 58 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para Santa Apolónia para uma cheia frequente sem muro em maré viva em baixa-mar.

#### 4.4.2.2 Beato

O cenário de descarga em profundidade no Beato permite uma dispersão mais eficiente da pluma do que o cenário de descarga à superfície. Esta dispersão eficiente faz com que no campo próximo o transporte advectivo da pluma para montante ou jusante seja muito menos acentuado do que se verifica com as descargas à superfície. Em termos de persistência temporal a área onde, por exemplo, ocorrem diluições inferiores a 10 durante mais de 5 horas é muito maior na descarga à superfície (Figura 59) que na descarga em profundidade (Figura 60). É possível identificar na descarga à superfície uma pluma onde existe uma persistência temporal para ocorrerem concentrações maiores. Na descarga em profundidade a pluma tende a ter menor persistência (Figura 60).

Nas descargas em profundidade existe uma grande diferença em termos de persistência temporal entre os cenários em baixa-mar de maré viva e preia-mar de maré morta tanto para a primeira localização testada (Figura 60, Figura 61) como para a segunda (Figura 62 e Figura 63). Esta maior persistência temporal deve-se ao facto de a pluma para o cenário de baixa-mar maré viva ter um carácter mais oscilatório. A consequência é uma pluma de diluição mínima que tanto se estende para montante como para jusante (Figura 51) enquanto no cenário de preia-mar maré morta a pluma de diluição mínima está mais concentrada no espaço e tende a desenvolver-se mais na direção *off-shore* (Figura 53). O facto de a pluma neste cenário estar mais concentrada no espaço faz com que a persistência com que a diluição é inferior a 10 também seja maior na zona adjacente à descarga (Figura 61). Este maior foco faz com que no cenário de preia-mar em aproximadamente metade do domínio do modelo (de campo próximo) a diluição inferior a 10 não ultrapasse 1 h (Figura 61), enquanto, que no cenário de baixa-mar a área onde a diluição é inferior 10 durante menos de 1 hora é muito diminuta.

A maior capacidade de dispersão da localização alternativa já identificada na análise espacial dos campos diluição também se confirma na análise temporal dos campos de diluição. Em ambos os cenários testados a localização alternativa apresenta tempos, em que a diluição é superior a 10, inferiores (baixa-mar/maré-viva Figura 62, preia-mar/maré-morta Figura 63) aos da localização 200 m a sul (baixa-mar/maré-viva Figura 60, preia-mar/maré-morta Figura 61).

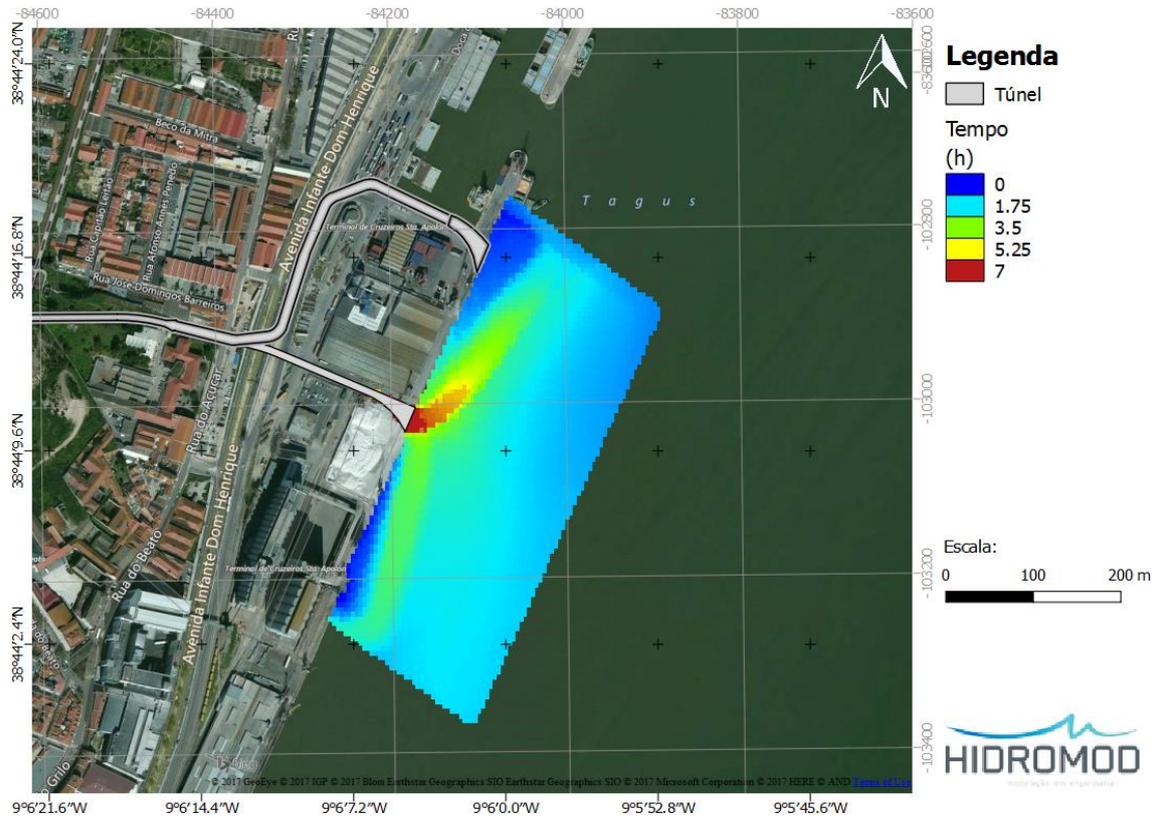


Figura 59 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para o Beato para uma cheia frequente com descarga à superfície em maré viva em baixa-mar.

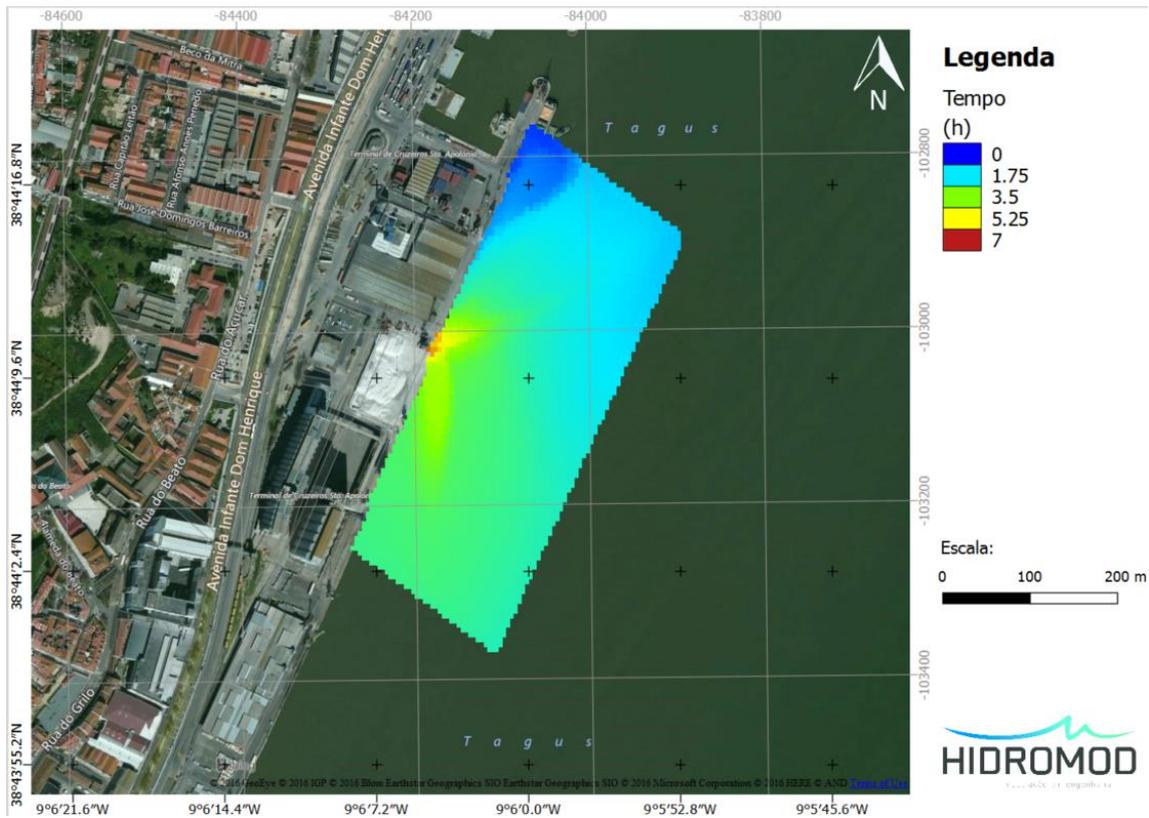


Figura 60 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para o Beato para uma cheia frequente com descarga em profundidade em maré viva em baixa-mar.

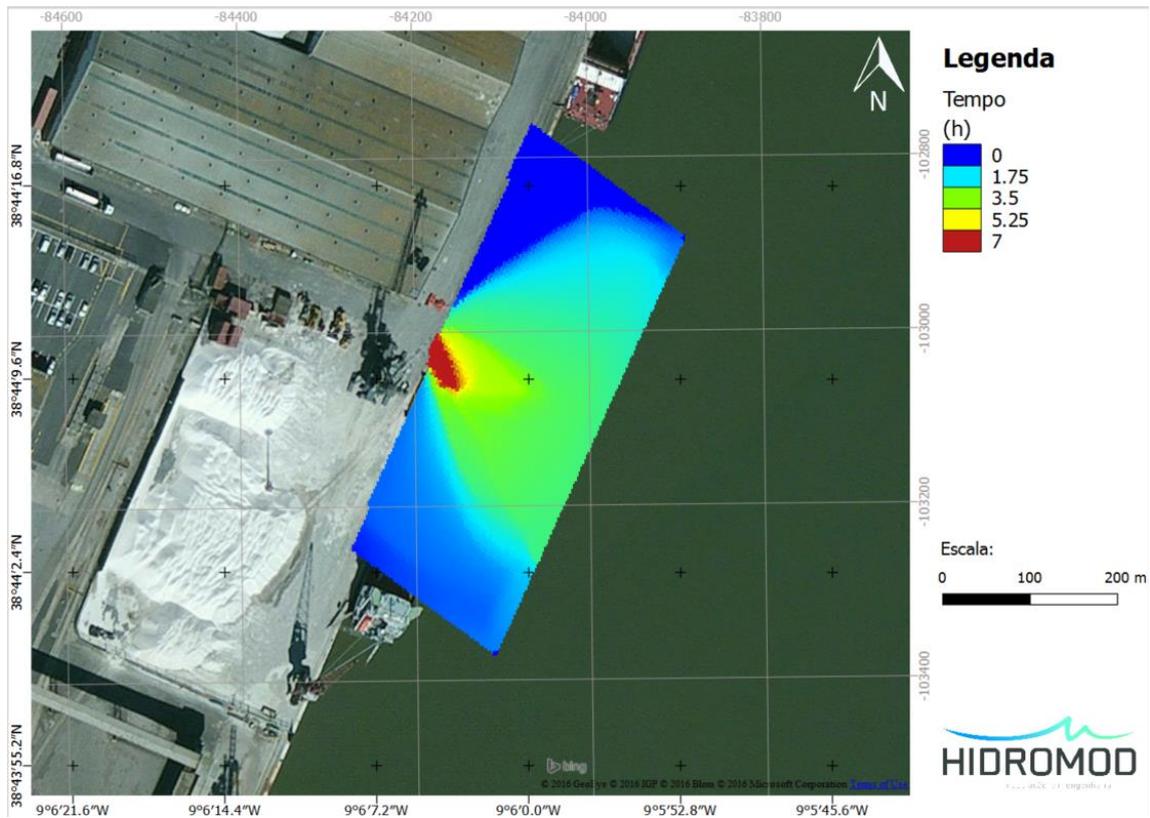


Figura 61 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para o Beato para uma cheia frequente com descarga em profundidade em maré morta em preia-mar.



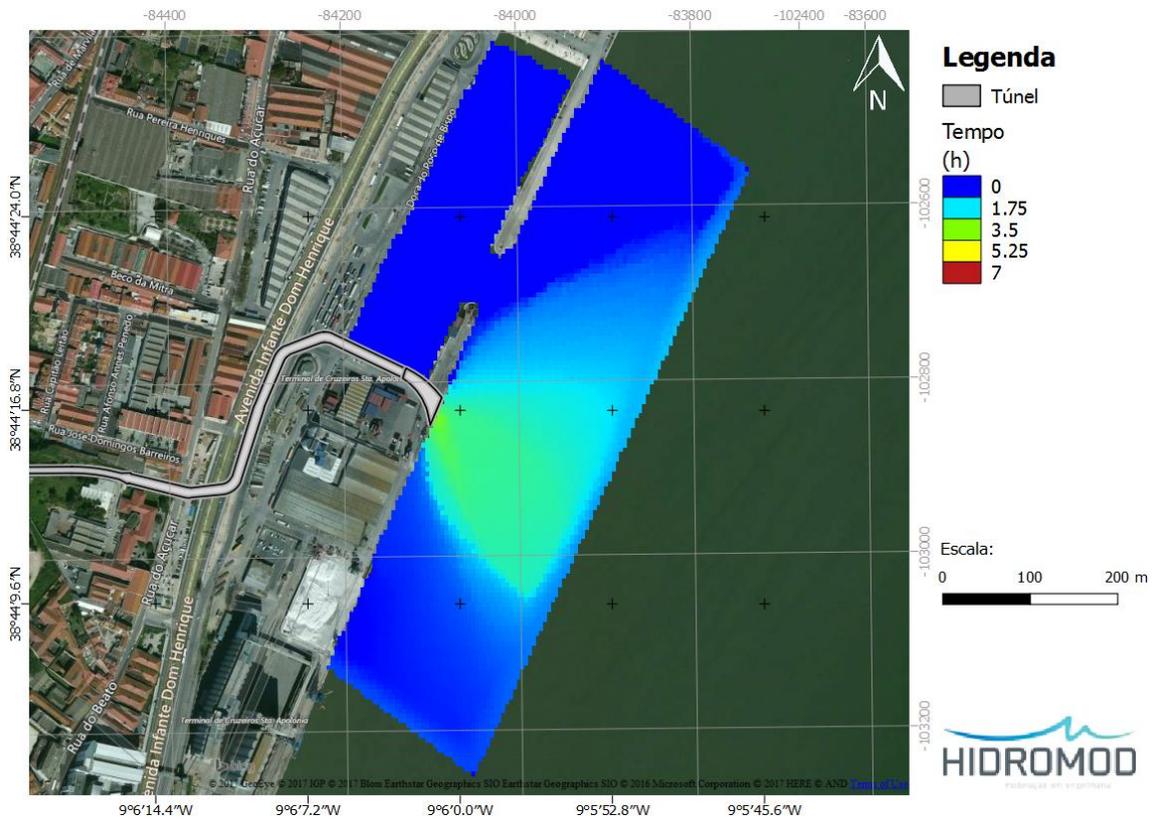


Figura 63 - Tempo durante o qual a diluição à superfície é inferior 10 para a localização alternativa do Beato para uma cheia frequente com descarga em profundidade em maré morta em preia-mar.

## 5 Conclusões

As conclusões do trabalho realizado podem-se resumir nos seguintes pontos:

- Na descarga dos jatos de água doce na água do Estuário, com salinidade elevada, a força de impulsão restringe as plumas à superfície, sendo a sua dispersão essencialmente na horizontal;
- Os principais impactes ocorrem no campo de correntes à superfície (na zona próxima das descargas);
- O muro previsto para Santa Apolónia e a descarga em profundidade prevista para o Beato permitem diminuir significativamente a intensidade das correntes à superfície, perpendiculares à frente cais, e aumentar a dispersão da pluma;
- O impacte sobre o transporte de sedimentos é diminuto uma vez que:
  - O efeito cumulativo dos eventos é muito reduzido;
  - A turbidez do efluente é da ordem de grandeza da do meio recetor (SST ~ 100 mg/l) e não está presente material sólido grosseiro;
  - Devido ao efeito da impulsão, as plumas geradas terão um efeito reduzido sobre a tensão de corte do fundo e conseqüentemente sobre os processos de erosão/deposição;
- O impacte sobre a qualidade da água é diminuto uma vez que:
  - O efeito cumulativo dos eventos é muito reduzido;
  - O meio recetor é naturalmente muito dispersivo (velocidades intensas);
  - A persistência temporal das plumas é pequena. Num evento de cheia frequente (5 vezes ao ano) o tempo máximo em que a diluição no campo próximo é inferior a 10 é de 1-7h para ambas as plumas. No caso do Beato, uma vez que se prevê que a descarga se faça em profundidade, em maré viva o tempo máximo numa célula em que a diluição é inferior a 10 é no máximo 4 horas;
- A segunda alternativa testada para a localização da zona terminal do Beato revelou, relativamente à primeira localização, um impacte:
  - semelhante sobre as velocidades superficiais;
  - menor sobre os sedimentos de fundo e a qualidade da água.

## 6 Referências

Bartolomeu S, Malhadas M, Leitão P, Dias J. Influence of MeteOcean processes on MSYM sea level predictions in the Singapore and Malacca Straits. 3.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, 24-26 June 2014, Lisbon, Portugal. Extended abstracts: 155-158.

[http://www.mohid.com/PublicData/Products/ConferencePapers/Bartalomeu\\_etal\\_3JEH.pdf](http://www.mohid.com/PublicData/Products/ConferencePapers/Bartalomeu_etal_3JEH.pdf)

Canário J, Vale C 2007. Monitoring program for the Tagus Estuary and tributaries, Scientific Report, IPIMAR, June 2007, p. 78.

Canas, A., A. dos Santos e P. Leitão, 2009. "Effect of large scale atmospheric pressure changes on water level in the Tagus Estuary", Journal of Coastal Research, SI 56 ICS2009 (Proceedings), pp. 1627 - 1631, ISSN 0749-0258.

Carrere, L., F. Lyard, M. Cancet, A. Guillot, and L. Roblou, 2012. FES 2012: A new global tidal model taking advantage of nearly 20 years of altimetry. Proceedings of the symposium "20 years of progress in radar altimetry", Venice.

Delpy MT, Ardhuin F, Otheguy P, Jouon A. Effects of waves on coastal water dispersion in a small estuarine bay. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014; 119: 1-17. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00170/28161/26390.pdf>

Franz G, Pinto L, Ascione I, Mateus M, Fernandes R, Leitão P, Neves R. Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2014; 151: 34-44.

Franz G. Modelling hydrodynamics and sediment dynamics in coastal systems. Tese de doutoramento em engenharia do ambiente, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2016 (em desenvolvimento).

Hidromod, 2003. Estudo das disponibilidades energéticas das correntes de maré junto aos terminais fluviais Relatório Final. TransTejo.

Leitão P., Leitão J., Neves R., Berzin G., Silva A., 2004. Hydrodynamics And Transport In The Coastal Zone Of São Paulo - Brazil. Proceedings 29th International Conference of Coastal Engineering 3: 3316-3328.

Leitão, P., Coelho, H., Santos, A., Neves, R., 2005. Modelling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: A downscaling approach. Journal of Atmospheric and Ocean Science, 10 (4), pp. 1-42.

Malhadas, M.S., Bartolomeu, S., Silva, A., Aires, A., Ribeiro, J., 2015. Sistema de observação operacional de Portugal. VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Novembro 2015, Aveiro, Portugal.

Malhadas, M.S., Leitão, P.C., Silva, A., Neves, R., 2009. Effect of coastal waves on sea level in Óbidos Lagoon. Continental Shelf Research 29 (9), pp. 1240-1250.

Mateus M., Riflet, G., Chambel, P., Fernandes, L., Fernandes, R., Juliano, M., Campuzano, F., de Pablo, H., and Neves, R., 2012. An operational model for the West Iberian coast: products and services. Ocean Science Discussion 9, 1651- 1689.

Matos, M.R. Métodos de análise e de cálculo de caudais pluviais em sistemas de drenagem urbana. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1987. (Tese de Especialista do LNEC).

Panagiotopoulos, I., Voulgaris, G., Collins, M.B., 1997. The influence of clay on the threshold of movement on fine sandy beds. Coastal Engineering 32, 19-43.

Perestrelo, J. (1971) - Comportamento de Canais e Bacias Dragados em Fundos Lodosos de Estuários. Instituto Superior Técnico. Lisboa.

POET, 2013. Plano de ordenamento do Estuário do Tejo.

Raudkivi, A. J., 1990. Loose Boundary Hydraulics (3rd ed.). Oxford: Pergamon Press.

Selvakumar A. e Borst M., 2006. Variation of microorganism concentrations in urban stormwater runoff with land use and seasons.. J Water Health. 2006 Mar;4(1):109-24.

Vaz N, Mateus M, Plecha S, Sousa MC, Leitão PC, Neves R, Dias JM. Modeling SST and chlorophyll patterns in a coupled estuary-coastal system of Portugal: The Tagus case study, *Journal of Marine Systems*, 147 (2015) 123-137.

Vaz N., Dias J.M., 2014. Residual currents and transport pathways in the Tagus estuary, Portugal: the role of freshwater discharge and wind. *Journal Of Coastal Research*. 610-615.

Vaz N., Leitão P.C., Dias J.M., 2007. Channel-ocean exchange driven by tides and river flow: Espinheiro Channel (Portugal)". *Journal Of Coastal Research*. S150, 1000-1004.

Vaz N., Mateus M., Dias J.M., 2011. Semidiurnal and spring-neap variations in the Tagus Estuary: Application of a process-oriented hydro-biogeochemical model. *Journal Of Coastal Research*. S164, 1619-1623.

## 7 Anexo - Validação do modelo hidrodinâmico

### 7.1 Nível do mar

Os níveis previstos pelo modelo e sua comparação com os níveis medidos no marégrafo de Cascais (Figura 64) para o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2012 são apresentados na Figura 65. Na Tabela 2 apresentam-se os parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas e as previsões do modelo.

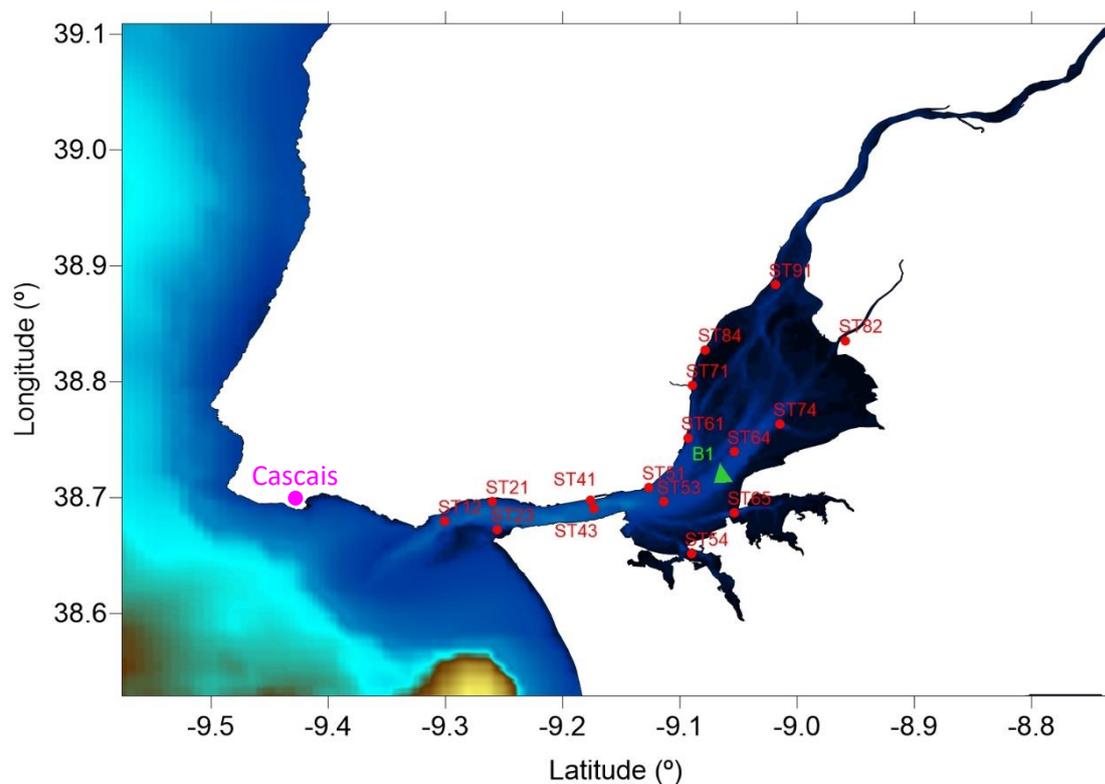


Figura 64 - Localização das estações de monitorização.

Os níveis previstos pelo modelo são concordantes com os níveis medidos apresentando erros relativos da ordem de 3% que se traduz num erro médio de 9 cm. Os resultados mostram ainda uma boa correlação com as medidas indicando que os valores previstos pelo modelo seguem a tendência média das medidas.

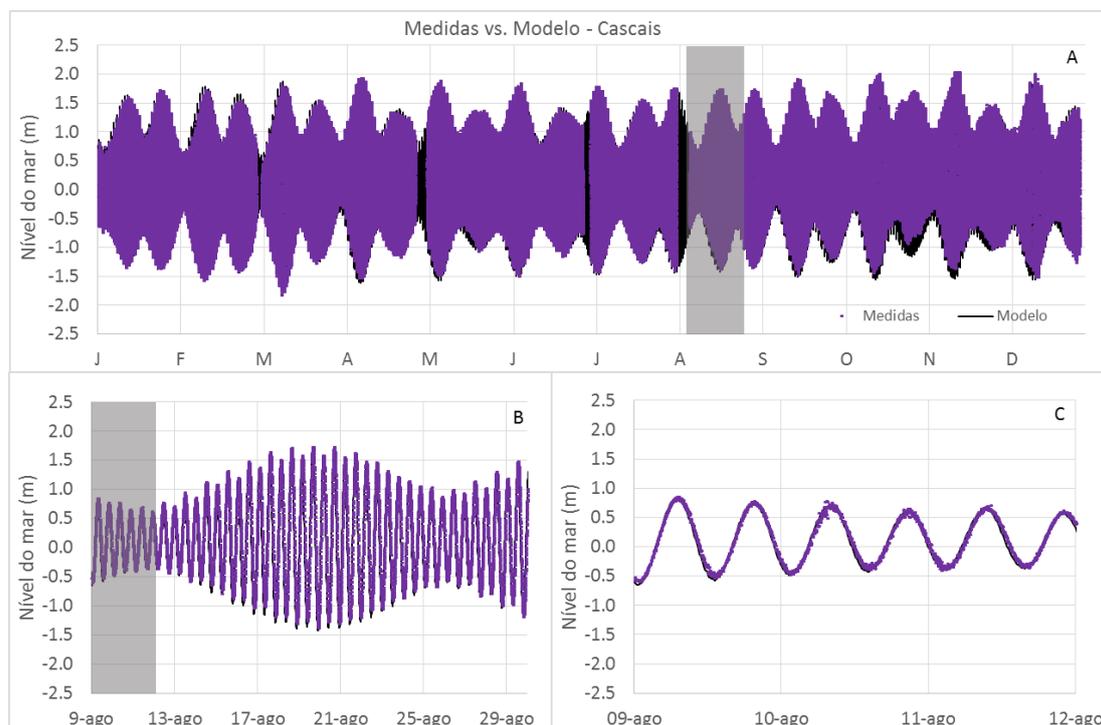


Figura 65. Comparação entre o nível de maré medido no marégrafo de Cascais (pontos roxo) e o previsto pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B) e para 3 dias em agosto de 2012 (C).

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas do nível do mar e os valores previstos pelo modelo no local do marégrafo de Cascais para o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro de 2012.

Marégrafo	Nº dados	R	RMSE (m)	NRMSE (%)
Cascais	43539	0.993	0.09	3

## 7.2 Correntes

As correntes previstas pelo modelo para o período de 26 de Junho a 31 de Dezembro de 2012 e comparação com as medidas obtidas através do ADCP instalado no local B1 (Figura 64) apresentam-se na Figura 66. Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas e as previsões do modelo.

Os resultados obtidos para a comparação do módulo da velocidade mostram que existe uma boa correlação ( $R \sim 0.8$ ) com os dados medidos no local B1 (Figura 64). O erro

(RMSE) estimado para cerca de um período de 6 meses corresponde a  $0.16 \text{ m.s}^{-1}$ . A comparação das velocidades mostra que mostra que as correntes naquele local têm uma grande oscilação ao ciclo maré viva-maré morta. As intensidades de mais elevadas ocorrem nas vazantes quando o nível de água diminui, com valores de pico na ordem de  $1.0 \text{ m.s}^{-1}$  na maré viva e  $0.4 \text{ m.s}^{-1}$  na maré morta.

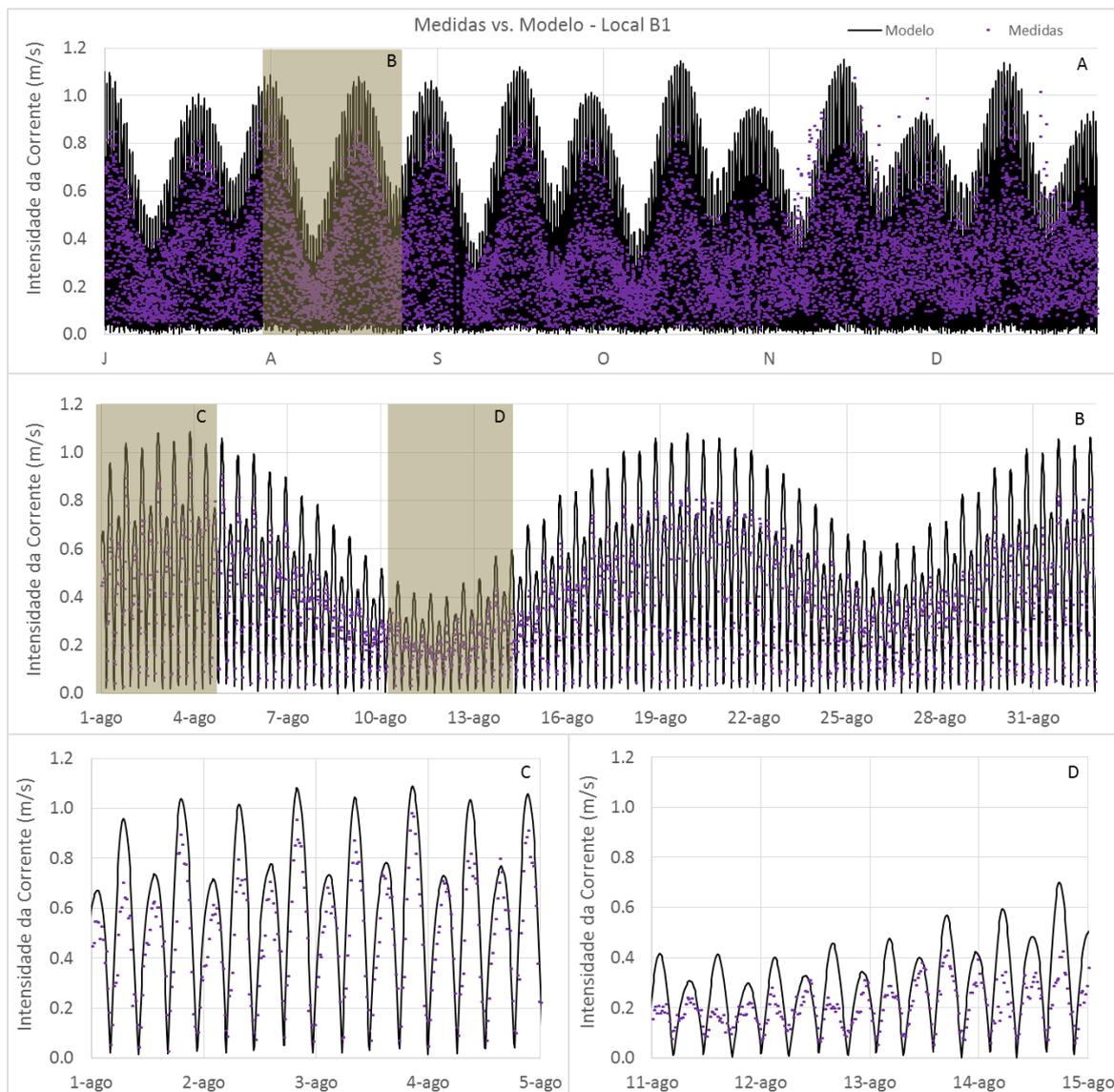


Figura 66. Comparação entre as correntes medidas no local B1 (pontos roxo) e os valores previstos pelo modelo MOHID (linha preta) para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012 (A), para um ciclo de maré viva-morta em agosto de 2012 (B), para 5 dias de marés vivas em agosto de 2012 (C) e 5 dias de marés mortas em agosto de 2012.

*Tabela 3 - Parâmetros estatísticos obtidos entre as medidas de correntes e os valores previstos pelo modelo no local B1 para o período de 1 de julho a 31 de dezembro de 2012.*

<b>ADCP</b>	<b>Nº dados</b>	<b>R</b>	<b>RMSE (m.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>NRMSE (%)</b>
Local B1	13294	0.797	0.16	22