



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA  
Zonas Costeiras 2013

## **Sistema computacional de alta resolução para planeamento e resposta a derrames de hidrocarbonetos em aplicações oceânicas, costeiras e estuarinas**

**Alberto Azevedo<sup>1</sup>, Sérgio den Boer<sup>2</sup>, Gonçalo Jesus<sup>3</sup>, João Gomes<sup>4</sup>, Anabela Oliveira<sup>5</sup> e André B. Fortunato<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Oceanógrafo físico, Doutor em Ciências Geofísicas e da Geoinformação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, aazevedo@lnec.pt

<sup>2</sup> Licenciado em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, Bolseiro de investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, sboer@lnec.pt

<sup>3</sup> Eng.º Informático, Bolseiro de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, gjesus@lnec.pt

<sup>4</sup> Eng.º Informático, Bolseiro de investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, jlgomes@lnec.pt

<sup>5</sup> Eng.ª Civil, Doutora em Eng.ia do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, aoliveira@lnec.pt

<sup>6</sup> Eng.º Civil, Doutor em Eng.ia do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, afortunato@lnec.pt

**Palavras-chave:** Derrames de petróleo no mar, modelação numérica, sistemas de previsão em tempo real

**Tema:** Modelação das zonas costeiras

**Tipo de comunicação:** comunicação oral

### **Resumo**

Os derrames de hidrocarbonetos no oceano têm efeitos catastróficos a nível social, económico e ambiental, colocando em risco a sustentabilidade e o desenvolvimento das regiões costeiras afetadas. O aumento do número de concessões e blocos de exploração através da adoção de novas metodologias de prospeção, resulta num aumento do risco de ocorrência de derrames em profundidade durante as fases de exploração e produção. O aumento de atividade nestas fases enfatiza a necessidade de criação de ferramentas específicas para a prevenção e mitigação deste tipo de catástrofes, que consideram os vários mecanismos forçadores e os processos relevantes de degradação do óleo em meio estuarino e marinho.

Este trabalho apresenta uma metodologia que permite abordar a problemática dos acidentes de derrames em duas vertentes: 1) a análise de risco detalhada para apoio à prevenção e mitigação de acidentes, através da



otimização de planos de contingência à escala local em zonas costeiras, portos e estuários, e 2) o desenvolvimento e validação de um sistema de apoio à emergência de derrames de hidrocarbonetos, aliando um sistema de modelação com um sistema de previsão em tempo real. A utilização de modelos numéricos de malhas não-estruturadas é fundamental para as duas funcionalidades, dado que permite simular processos físicos numa abordagem multi-escala, abrangendo domínios que se estendem do oceano profundo até às zonas costeiras e estuarinas.

A metodologia proposta poderá ser uma mais-valia para gestores costeiros, empresas petrolíferas e empresas consultoras, permitindo-lhes obter informações pormenorizadas sobre a dinâmica das regiões de estudo, e a quantificação detalhada do perigo de derrames e dos seus impactos, melhorando significativamente os planos de contingência a nível local, e contribuindo para a gestão da emergência e emissão de alertas precoces para proteção de bens em risco em caso de acidentes através do sistema de previsão em tempo real de derrames de hidrocarbonetos.

## Introdução

As consequências dos derrames de hidrocarbonetos no mar podem ser catastróficas, como ilustra o acidente do Golfo do México em 2010 (Dietrich et al., 2012). Os danos colaterais causados por este tipo de eventos têm um impacto significativo nas economias costeiras, podendo mesmo colocar em risco a sustentabilidade e o desenvolvimento das regiões afetadas. Estes problemas têm por isso motivado a criação de ferramentas específicas para a prevenção e mitigação deste tipo de catástrofes ambientais, que têm em conta os vários mecanismos forçadores e os processos relevantes de degradação do óleo em meio estuarino e marinho.

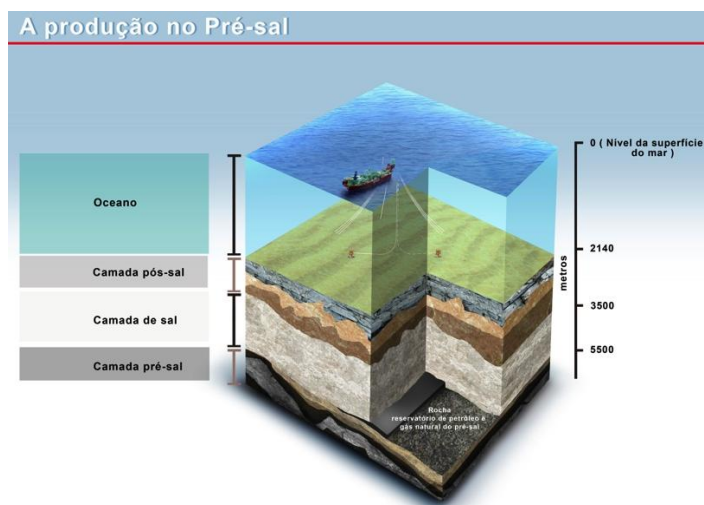


Figura 1: Esquema representativo das camadas estratigráficas (fonte: <http://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/>).

O desenvolvimento de novas metodologias de prospeção permitiu o alcance das camadas do pré-sal (<http://www.petrobras.com.br/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/petroleo/presal/>, Figura 1), resultando num aumento da exploração em profundidade, impossível de realizar há alguns anos atrás. Por conseguinte, alguns blocos de exploração que no passado foram considerados como inviáveis para produção, estão novamente a ser revisitados com as novas metodologias. Como exemplo, veja-se os casos da margem continental Portuguesa (Figura 2a), e ao longo de toda a costa de Moçambique (Figura 2b). Verificou-se, por isso, um aumento do número de concessões e blocos de exploração em todo o globo, elevando assim o risco de acidentes de petróleo durante as fases de exploração e produção a grandes profundidades (ex: o caso do derrame da plataforma Deep Horizon em 2010 - Dietrich et al., 2012).

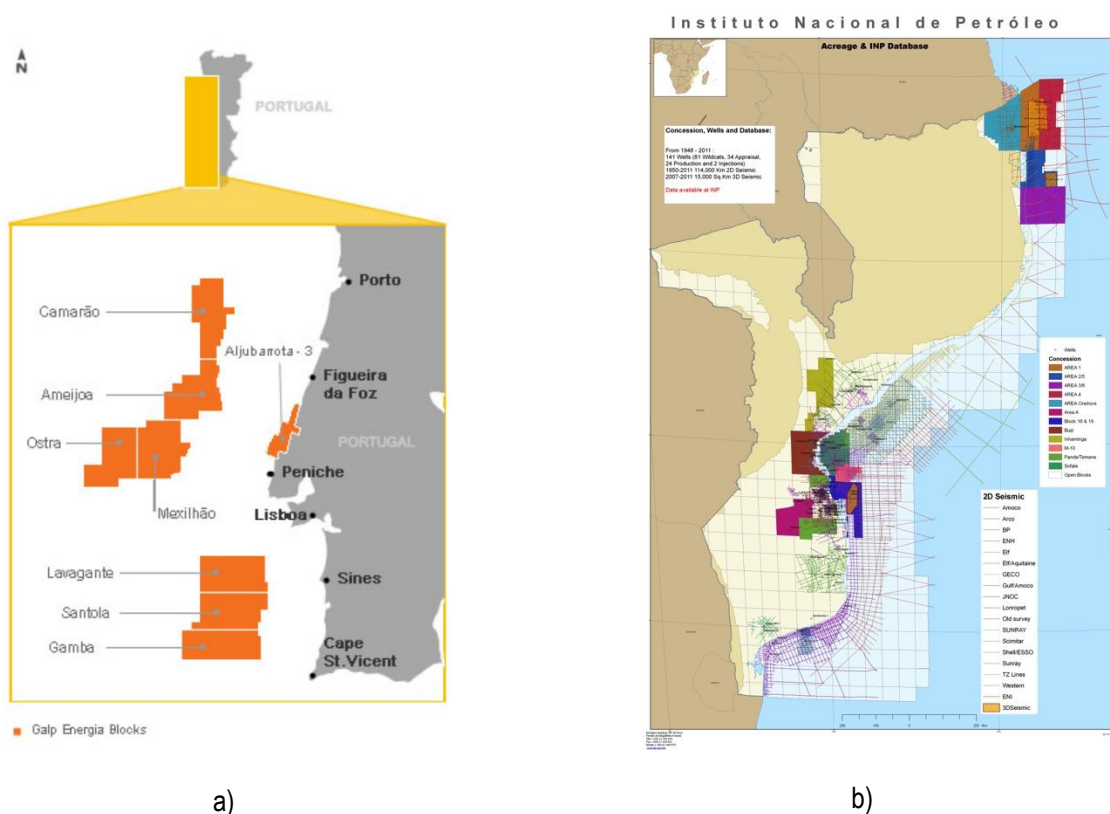


Figura 2: a) Exemplo das zonas concessionadas de exploração e produção dos diversos consórcios em que a GALP participa – (fonte: <http://www.galpenergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Presenca-no-mundo/Portugal/Paginas/Exploracao-Desenvolvimento-Portugal.aspx>); b) mapa das zonas de concessão, poços e ensaios realizados ao longo de toda a costa Moçambicana (fonte: <http://www.inp-mz.com/Downloads/Maps/Acreage%20Map%20e%20INP%20Database.pdf>).

Considerando que existe uma procura efetiva de exploração de novos recursos fósseis, é notória a necessidade de dotar os gestores costeiros e as entidades com responsabilidades no combate a derrames de hidrocarbonetos com ferramentas robustas e precisas para uma correta gestão de situações de crise e catástrofe ambiental e a sua



prevenção.

## Objetivos

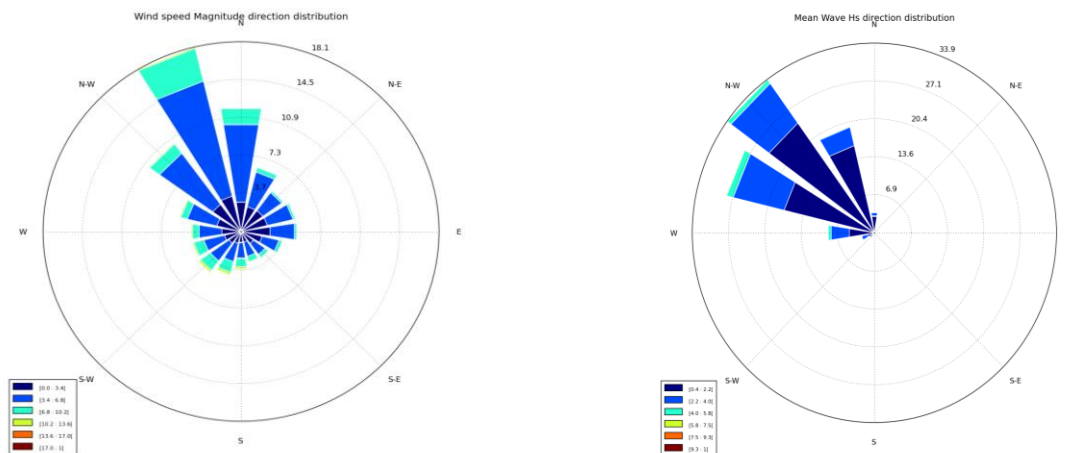
O principal objetivo deste trabalho consiste na apresentação de uma nova metodologia, em desenvolvimento no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que visa otimizar planos de contingência à escala local em zonas costeiras, portos e estuários e providenciar previsões em tempo real da evolução das plumas de hidrocarbonetos em caso de acidente. A referida metodologia está a ser desenvolvida no âmbito de vários projetos em curso no LNEC, financiados pelo programa INTERREG-Arco Atlântico (EU), pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), e pela Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento (FLAD) e National Science Foundation (NSF). Pretende-se fornecer aos gestores costeiros e entidades com responsabilidade no combate a acidentes de petróleo, um sistema de previsão em tempo real de derrames que promova uma gestão mais eficaz dos recursos de apoio à emergência disponíveis com base em informação correta e disponibilizada em tempo útil, durante um evento desta natureza.

## Metodologia

Propõe-se neste estudo uma nova metodologia de apoio à resposta a acidentes de hidrocarbonetos nas zonas costeiras. A metodologia proposta pode subdividir-se em dois modos distintos que apresentam características e objetivos de aplicabilidade diferenciadas. O referido sistema pode ser utilizado nos seguintes modos:

### 1) Sistema de análise de risco.

No modo de sistema de análise de risco é dado apoio à prevenção e mitigação de acidentes, através da otimização de planos de contingência à escala local em zonas costeiras, portos e estuários. Neste modo de utilização é realizada uma análise climatológica da região de estudo (Figura 3), que por sua vez será utilizada para a caracterização e construção de uma base de dados de simulações hidrodinâmicas dos regimes mais frequentes e também mais favoráveis para a ocorrência de um derrame de hidrocarbonetos.





11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA  
Zonas Costeiras 2013

a)

b)

Figura 3: Exemplo dos mapas de a) distribuição da velocidade e direção do vento e b) altura significativa média e direção da agitação marítima para a região de Aveiro para o período compreendido entre janeiro de 1979 e março de 2012.

Sobre este conjunto de simulações hidrodinâmicas são realizadas diversas simulações de derrame, em vários pontos do domínio (passíveis de ocorrência de derrame) e diferentes tipos de óleo (representativos do tipo de óleo presente nas atividades de exploração e transporte). Depois de construída a base de dados de cenários possíveis, e ordenada pela probabilidade de ocorrência, são adicionados outros fatores a ter em conta, tais como: o índice de suscetibilidade ambiental, mapas de vulnerabilidade do sistema em estudo, informação referente a recursos disponíveis para o combate a derrames, etc. Posteriormente, considerando todo este manancial de informação, é realizada uma análise de risco detalhada para o domínio de atuação, que, por sua vez, é disponibilizada aos gestores costeiros através de uma plataforma WebSIG (Jesus et al., 2012). Através desta plataforma, o utilizador pode consultar online todos os mapas requeridos bem como tirar partido de diversas ferramentas de análise inerentes a um SIG. Na Figura 4 podem observar-se, na plataforma WebSIG e apenas a título de exemplo, os mapas com os índices de suscetibilidade ambiental (trabalho desenvolvido e coordenado pela Prof. Fátima Alves, do Laboratório Associado CESAM da Universidade de Aveiro; deve referir-se que o CESAM é parceiro do LNEC nos projetos, em curso, SPRES e PAC:MAN), assim como o campo das salinidades à superfície resultante do modelo hidrodinâmico integrado no RDFS-PT (Jesus et al., 2012; ver secção seguinte).



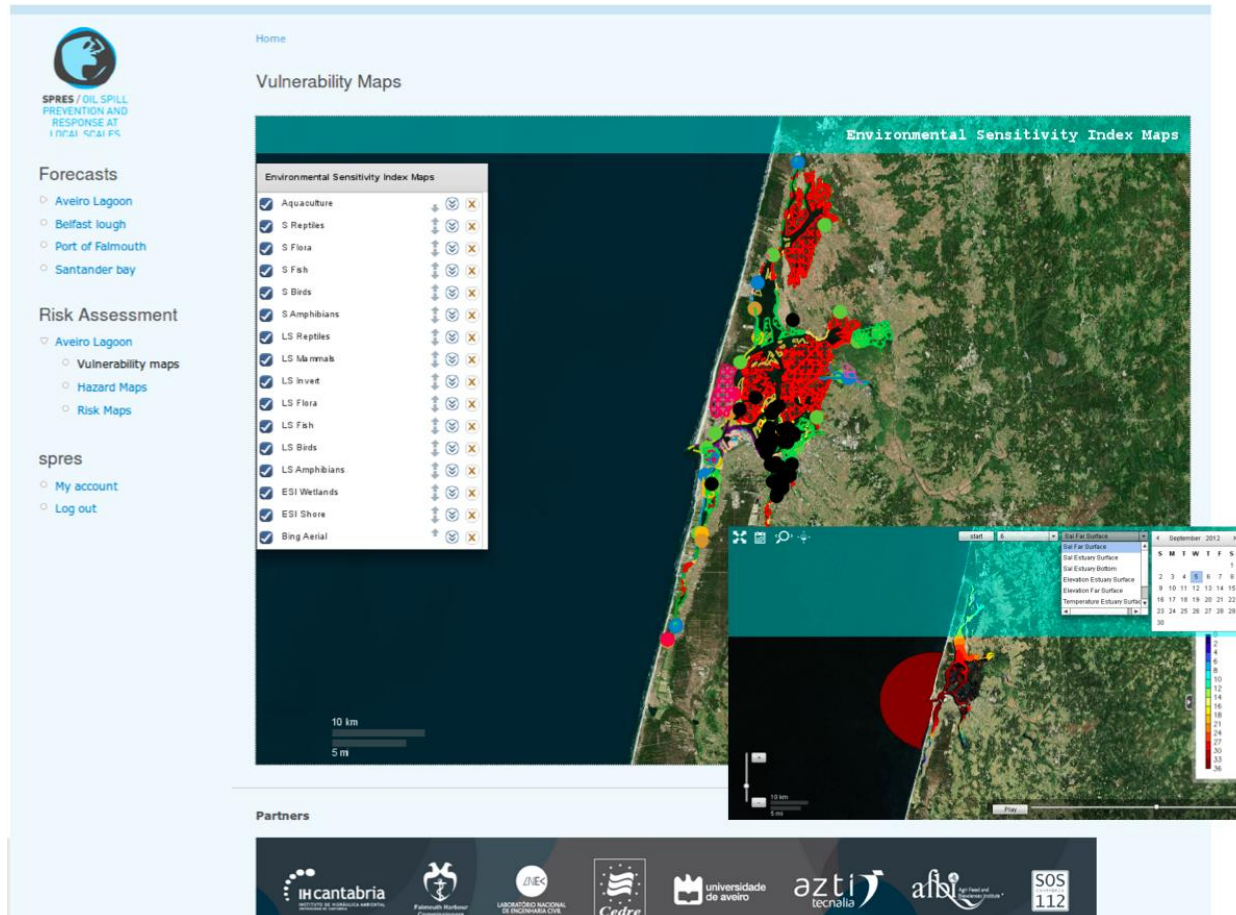


Figura 4: Captura de ecrã de um exemplo de utilização da plataforma de WebSIG. Neste exemplo são apresentados os mapas de índices de sensibilidade ambiental e salinidade à superfície para a região da Ria de Aveiro.

Este modo de utilização revela-se de grande utilidade para o desenvolvimento e otimização de planos de contingência bem como para a correta gestão dos recursos logísticos de combate a acidentes de hidrocarbonetos em ambientes costeiros. Uma vez que, neste modo, é construída uma base de dados com todos os cenários possíveis de ocorrência de derrames de hidrocarbonetos, os gestores costeiros podem efetuar ações de formação com base nos cenários simulados e rever os planos de contingência existentes de forma a mitigar eficientemente as consequências de um derrame.

## 2) Sistema de previsão em tempo real da evolução de plumas de hidrocarbonetos

O segundo modo de operacionalidade proposto consiste no desenvolvimento e validação de um sistema de apoio à emergência de derrames, aliando um sistema de modelação multi-escala com um sistema de previsão em tempo real. O modo de previsão em tempo real consiste na integração de um modelo numérico 2D/3D de derrames de hidrocarbonetos (VOILS; Azevedo et al., 2009 e Azevedo, A., 2010) num sistema de previsão em tempo real (RDFS-PT, <http://ariel.lnec.pt>; Jesus et al., 2012), sendo os resultados apresentados numa plataforma WebSIG, que alia a acessibilidade da web às capacidades de visualização e análise de informação dos SIGs.



O LNEC tem várias décadas de experiência na utilização e desenvolvimento de modelos baseados em malhas não-estruturadas. Nos últimos anos, tem estado associado ao desenvolvimento de sistemas de modelos comunitários ELCIRC (Zhang et al., 2004) e SELFE (Zhang e Baptista, 2008), incluindo desenvolvendo módulos hidrodinâmicos (Dodet et al., 2013), morfodinâmicos (e.g., Bertin et al., 2009), de transporte (Oliveira et al., 2000; Oliveira e Fortunato, 2002), de dinâmica de ecossistemas (e.g., Rodrigues et al., 2009), de contaminação fecal (e.g., Rodrigues et al., 2011) e de derrames de hidrocarbonetos (e.g., Azevedo et al., 2009). Este tipo de modelos é particularmente adequado à representação de linhas de costa complexas e estudos costeiros. A utilização de modelos numéricos baseados em malhas não-estruturadas permite simular processos físicos numa abordagem multi-escala (Figura 5). O conceito multi-escala consiste em utilizar-se uma única malha de cálculo horizontal para representar o domínio de estudo, que pode estender-se desde o oceano profundo até às zonas costeiras, sem que seja necessário recorrer a métodos de malhas encaixadas.

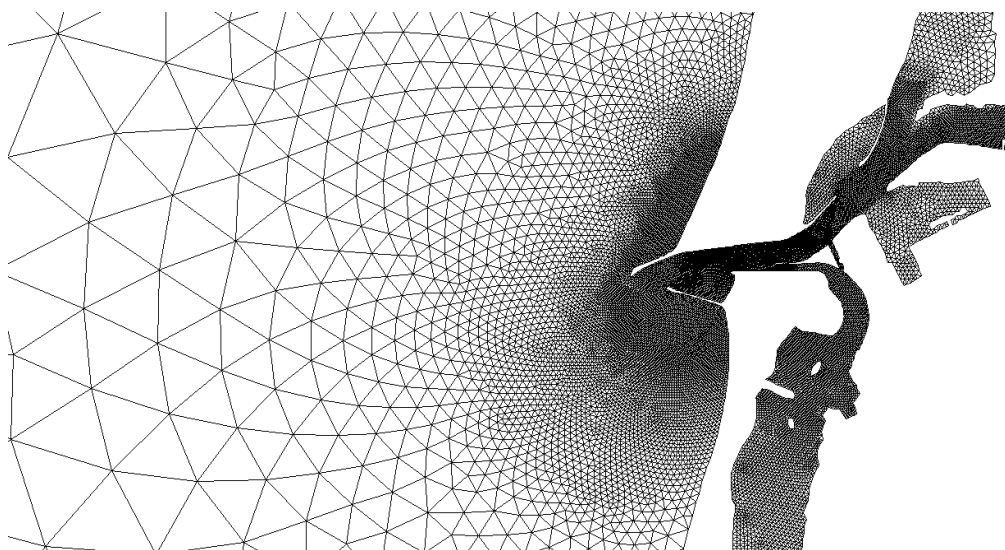


Figura 5: Exemplo da malha não-estruturada desenvolvida para a Ria de Aveiro. Neste exemplo, os elementos menos resolvidos (à esquerda) apresentam uma resolução de cerca de 2 km, contrastando com os elementos no interior da barra (à direita), com resoluções espaciais da ordem dos 10 m.

O LNEC desenvolveu, nos últimos anos, um sistema de previsão oceanográfica em tempo real (RDFS-PT – <http://ariel.lnec.pt>), tendo por base o modelo hidrodinâmico SELFE (Zhang e Baptista, 2008) e o modelo de agitação marítima WW3 (Tolman, H.L., 2009) (Figura 6a). O sistema RDFS-PT é um ambiente de integração da simulação numérica em tempo real e de dados on-line da costa Portuguesa. Esta plataforma disponibiliza resultados de previsões da circulação em sistemas costeiros selecionados (níveis, correntes, agitação marítima, salinidades e temperatura), validados por dados em tempo quasi-real. O utilizador tem a possibilidade de comparar, em tempo quasi-real, os resultados do modelo numérico com os dados descarregados dos instrumentos *in-situ*, avaliando assim o desempenho do sistema de modelação sempre que desejar. Esta plataforma é baseada na tecnologia desenvolvida no Center for Coastal Margin Observation & Prediction (CMOP, E.U.A.), colaborador do LNEC de longa data.

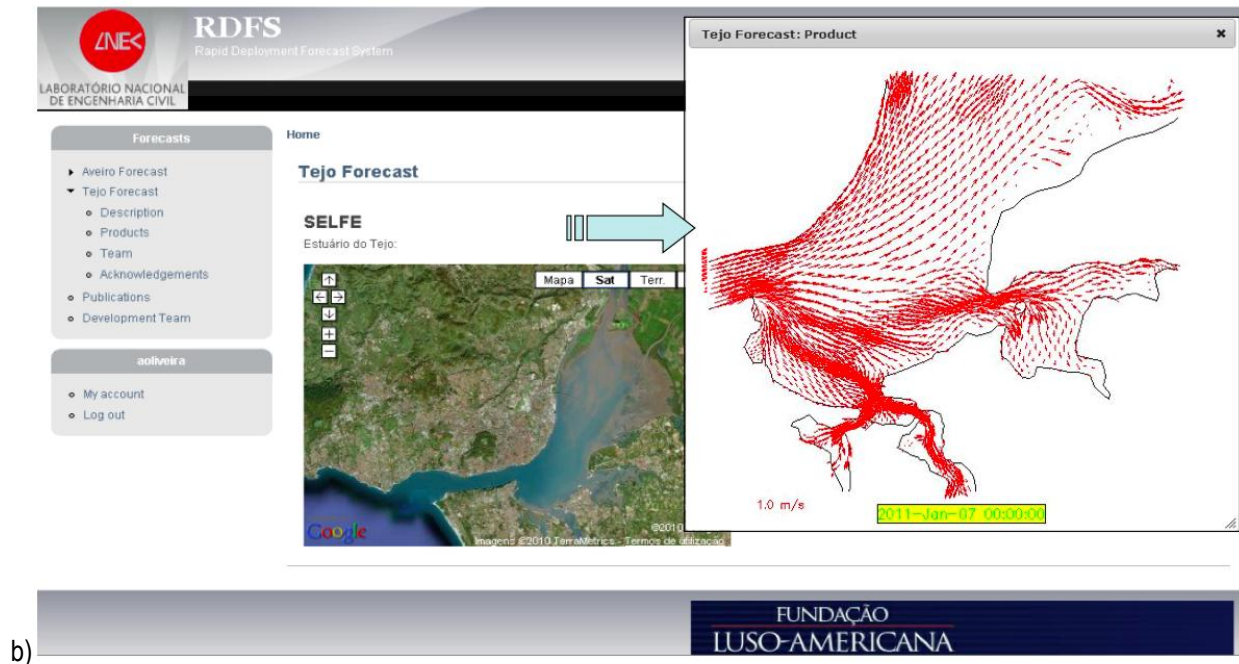
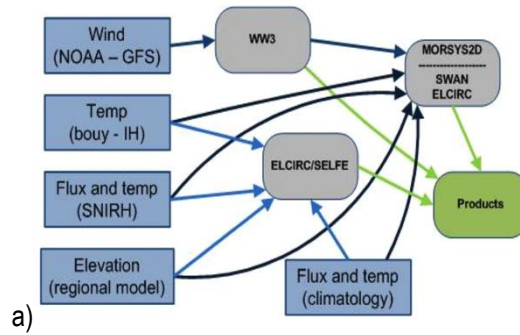


Figura 6: Sistema RDFS-PT. a) Esquema dos modelos utilizados no sistema de previsão em tempo real; b) Captura de ecrã do sistema de previsão em tempo real para o estuário do Tejo.

O sistema RDFS-PT, que já está operacional para os sistemas da Ria de Aveiro e do estuário do rio Tejo e também para a simulação da agitação marítima na costa Portuguesa, contará a curto prazo com a integração do modelo de derrames de hidrocarbonetos VOILS (Azevedo et al., 2009 e Azevedo, A., 2010), desenvolvido numa abordagem de *High-Performance Computing*, para o cálculo dos processos de transporte e transformação do óleo à superfície e em profundidade (Figura 7). O modelo numérico VOILS tem implementados os processos mais significativos para o transporte e evolução reológica do óleo à superfície e em profundidade, tais como: advecção, evaporação,





espalhamento à superfície, emulsificação, dispersão e dissolução na coluna de água e retenção costeira. O processo de derrames em profundidade encontra-se em fase de implementação, não estando por isso, ainda disponível na última versão do modelo.

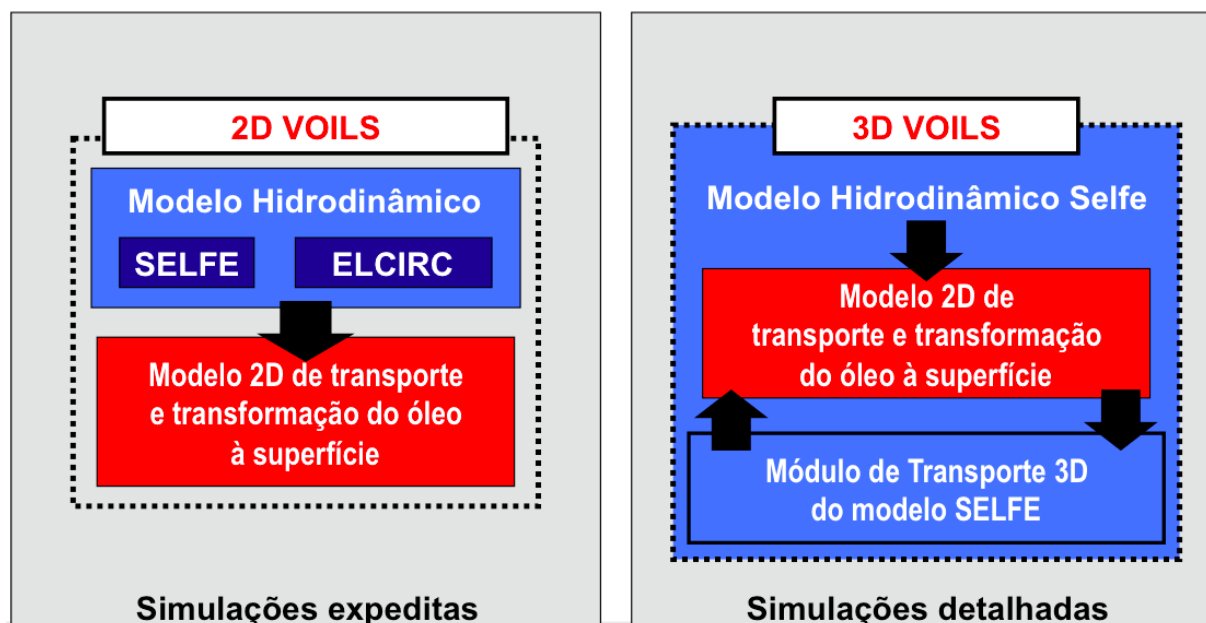


Figura 7: Esquema representativo das versões 2D e 3D do modelo numérico VOILS.

Os resultados do sistema de modelação são apresentados através da plataforma WebSIG (Figura 4), desenvolvida no LNEC, no âmbito do projeto de investigação INTERREG, SPRES – “Oil Spill Prevention and Response at Local Scales”. Esta plataforma será usada para apresentar os mapas com: i) a trajetória da mancha de hidrocarbonetos durante um derrame; ii) zonas mais afetadas pelo óleo e áreas de retenção de óleo na costa; iii) mapas resultantes da análise de risco bem como mapas de vulnerabilidade e susceptibilidade ambiental e económica, etc.

## Conclusões

Apresenta-se neste trabalho um sistema de alta resolução espacial, em desenvolvimento no LNEC, para mitigação dos efeitos de derrames de hidrocarbonetos em zonas costeiras. O referido sistema está a ser desenvolvido no âmbito de diversos projetos em curso e pode ser adaptado a qualquer região. A utilização do sistema pode ser efetuada em dois modos distintos. Numa primeira abordagem o utilizador obtém resultados provenientes de uma análise de risco detalhada para a região em foco, possibilitando a otimização de planos de contingência das



autoridades portuárias ou outras entidades com responsabilidades no combate a acidentes de hidrocarbonetos. O sistema pode ainda ser utilizado em situações de crise através do sistema de previsão em tempo real, onde o gestor costeiro obtém informações referentes à previsão da trajetória da mancha, áreas afetadas, campo de correntes, temperatura e salinidade para várias horas/dias após o início do derrame. Tal como no modo de análise de risco, todos os resultados são apresentados online e usufruem de um ambiente de processamento e análise SIG.

Considera-se, portanto, que este sistema pode ser uma mais-valia para as autoridades portuárias, empresas petrolíferas ou mesmo consultoras, uma vez que lhes permite obter informações mais pormenorizadas sobre as regiões de estudo melhorando significativamente os planos de contingência ao nível local.

## Agradecimentos

Os autores do presente estudo querem agradecer às seguintes entidades: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC); ao programa INTERREG-Arco Atlântico (EU) pelo financiamento do projeto SPRES – “Oil Spill Prevention and Response at Local Scales”; à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento da bolsa de Pós-Doutoramento com a ref. SFRH/BPD/73089/2010 e também pelo financiamento do projeto de investigação PAC:MAN - Sistema de gestão do risco de acidentes de poluição em zonas costeiras; e por último, à Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento (FLAD) e National Science Foundation (NSF) pelo financiamento do projeto C-WOS – *A Computational System for Early Warning of Oil Spills in Estuaries and Coastal Regions*.

## Referências

- Azevedo, A., Oliveira, A., Fortunato, A. and Bertin, X. (2009). “*Application of an Eulerian-Lagrangian oil spill modeling system to the Prestige accident: trajectory analysis*”. Journal of Coastal Research, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium), 777 – 781. Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258.
- Azevedo, A., (2010). “*Sistema integrado de modelação para apoio à prevenção e mitigação de acidentes de hidrocarbonetos em estuários e na orla costeira*”. Tese de Doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação, especialidade Oceanografia, Universidade de Lisboa (<http://hdl.handle.net/10451/2332>).
- Dietrich, J.C., C.J.Trahan, M.T.Howard, J.G.Fleming, R.J.Weaver, S.Tanaka, L.Yu, R.A. Luetlich Jr., C.N.Dawson, J.J.Westerink, G.Wells, A.Lu, K.Vega, A.Kubach, K.M.Dresback, R.L. Kolar, C.Kaiser, R.R.Twilley (2012). “*Surface trajectories of oil transport along the Northern Coastline of the Gulf of Mexico*”, Continental Shelf Research, 41, 17-47.
- Dodet, G., X. Bertin, N. Bruneau, A.B. Fortunato, A. Nahon e A. Roland (2013). “*Wave-current interactions in a wave-dominated tidal inlet*”, Journal of Geophysical Research, 118: 1-19.
- Jesus G., Gomes J., Ribeiro N.A., Oliveira A. (2012). “*Custom deployment of a Nowcast-forecast information system in coastal regions*”, Geomundus 2012, <http://geomundus.org>.



<http://geomundus.org/media/Papers/JESUS%20G,%20Custom%20deployment%20of%20a%20Nowcast-forecast%20information%20system%20in%20coastal%20regions.pdf>

- Oliveira, A., Fortunato, A., Baptista, A., (2000). "Mass Conservation in Eulerian-Lagrangian Simulations of Transport in Estuaries". ASCE Journal of Hydraulic Engineering 126 (8), 605–614.
- Oliveira, A., Fortunato, A., (2002). "Towards an Oscillation-Free, Mass Conservative, Eulerian-Lagrangian Transport Model". Journal of Computational Physics 183(1), 142–164.
- Tolman, H. L. (2009), "User manual and system documentation of WAVEWATCH III", version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 p.
- Rodrigues, M., Oliveira, A., Queiroga, H., Fortunato, A., Zhang, Y., (2009). "Three-dimensional modeling of the lower trophic levels in the ria de aveiro (portugal)". Ecological Modelling 220 (9-10), 1274 – 1290.
- Rodrigues, M., Oliveira, A., Guerreiro, M., Fortunato, A.B., Menaia, J., David, L.M., Cravo, A. (2011). Modeling fecal contamination in the Aljezur coastal stream (Portugal), Ocean Dynamics, 61(6), 841-856.
- Zhang, Y., Baptista, A., Myers, E., (2004). "A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment". Continental Shelf Research 24, 2187–2214.
- Zhang, Y. e A.M Baptista (2008). "SELFIE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation", Ocean Modeling, 21(3-4), 71-96.