

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA OPERACIONAL DE PREVISÃO DE TEMPORAIS NA COSTA PORTUGUESA

André B. FORTUNATO¹; Ricardo TAVARES DA COSTA²; João ROGEIRO³; João L. GOMES⁴; Anabela OLIVEIRA⁵; Kai LI⁶; Paula FREIRE⁷; Ana RILO⁸; Ana MENDES⁹; Marta RODRIGUES¹⁰

RESUMO

As inundações em zonas estuarinas e costeiras podem causar danos significativos, como os que ocorreram no inverno 2013/2014 na costa Portuguesa. No entanto, estes danos podem ser mitigados se os eventos forem previstos com antecedência. Com vista a fornecer a informação necessária às autoridades, desenvolveu-se um sistema operacional de previsão dos níveis do mar na costa Portuguesa. Este sistema tem por base a simulação da agitação marítima e dos níveis devidos à maré e aos agentes atmosféricos, a escalas regionais e locais.

À escala regional, simula-se a agitação marítima com o modelo WaveWatch III no Atlântico Norte, com uma malha encaixada na costa Portuguesa. Paralelamente, simulam-se os níveis devidos à maré e agentes atmosféricos no Atlântico Nordeste com o modelo SCHISM. Numa segunda fase, estes modelos regionais são utilizados para forçar modelos locais que simulam de forma acoplada a agitação marítima e os níveis com base no código SCHISM-WWM. Como teste piloto a nível local, implementou-se um modelo do estuário do Tejo, incluindo zonas inundáveis na margem sul. O conjunto de modelos é executado diariamente, de forma automática, produzindo previsões de 48 horas. Os resultados são integrados na plataforma WIFF (*Water Information and Forecasting Framework* - <http://ariel.Inec.pt>) que os disponibilizam de forma ágil através de um *browser*.

¹ Eng.º Civil, Doutor em Eng.ª do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, afortunato@Inec.pt

² Eng.º do Ambiente, Doutorando em Engenharia Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, rcosta@Inec.pt

³ Eng.º Informático, Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, jrogeiro@Inec.pt

⁴ Eng.º Informático, Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, jl.gomes@Inec.pt

⁵ Eng.ª Civil, Doutora em Eng.ª do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, aoliveira@Inec.pt

⁶ Oceanógrafo, Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, likai@foxmail.com

⁷ Geóloga, Doutora em Geologia, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, pfreire@Inec.pt

⁸ Geóloga, Doutoranda em Território, Risco e Políticas Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, arilo@Inec.pt

⁹ Licenciada em Informática, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, amendes@Inec.pt

¹⁰ Eng.ª do Ambiente, Doutora em Biologia, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, mfrdrigues@Inec.pt

A presente comunicação descreve a implementação deste sistema operacional na costa portuguesa e no estuário do Tejo. Aborda-se primeiro a implementação e validação dos diferentes modelos, apresentando-se medidas de erro dos modelos a funcionar em modo de previsão. No caso do modelo regional de marés e sobre-elevações, inclui-se também uma comparação com previsões de outro modelo. Descreve-se depois sumariamente a plataforma *WebGIS* que permite ao utilizador aceder e visualizar os resultados.

Palavras-chave: oceanografia operacional; costa portuguesa; estuário do Tejo; níveis extremos; marés; agitação marítima.

1. INTRODUÇÃO

Muitas zonas costeiras têm um risco elevado de inundação e galgamento. Por um lado, são em geral zonas densamente povoadas, particularmente vulneráveis a eventos extremos. Por outro lado, têm frequentemente cotas altimétricas baixas e estão expostas à ação do mar, nomeadamente às variações do nível devido às marés, sobre-elevações de origem meteorológica e agitação marítima. Efeitos das alterações climáticas, como a subida do nível do mar e o aumento da intensidade da agitação marítima agravam ainda esta perigosidade.

Na última década, tem-se assistido a inundações catastróficas, como o furacão Katrina em 2005 (Dietrich *et al.*, 2011), e a tempestade Xynthia em 2010 (Bertin *et al.*, 2012). Mais recentemente, o inverno 2013/2014 deixou marcas em toda a costa Atlântica europeia. Em Portugal, os prejuízos causados pela tempestade Hércules em 2014 foram estimados em 21 milhões de euros (jornal Expresso, 31/1/2014). Há por isso uma forte motivação para prever estes eventos extremos com alguma antecedência, por forma a acionar mecanismos de proteção de pessoas e bens e reduzir as suas consequências.

Esta necessidade de prever de forma quantitativa os eventos extremos motivou o desenvolvimento de um sistema de previsão de níveis do mar extremos na costa Portuguesa. Diariamente, este sistema simula a agitação marítima e os níveis do mar devidos à maré, vento e pressão atmosférica para as 48 horas seguintes. Estas previsões são feitas a escalas regionais, que excedem largamente o território nacional (Figura 1). Os resultados podem ser usados para forçar modelos locais, de alta resolução, que permitem prever os níveis junto à costa ou no interior de estuários. Esta possibilidade é ilustrada numa aplicação ao estuário do Tejo, em que se simula de forma acoplada a circulação e a agitação marítima (Figura 1).

Os processos de previsão, deteção e de alerta e aviso são crescentemente assegurados por sistemas automáticos (e.g., SAGE-B - Jesus *et al.* (2010), WIFF - *Water Information Forecast Framework* - Oliveira *et al.*, 2014), suportados por interfaces *web* que permitem aceder a previsões e dados de monitorização e oferecem alguma interatividade com o utilizador (e.g., através da pesquisa de resultados dos modelos de previsão em locais escolhidos pelo utilizador). Este artigo apresenta um sistema de previsão em tempo real para a costa Portuguesa e estuário do Tejo, a funcionar de modo operacional no LNEC, que é baseado na plataforma WIFF, adaptada às necessidades funcionais do projeto MOLINES

(<http://www.lnec.pt/hidraulica-ambiente/pt/projectos/detalhe/molines-modelacao-da-inundacao-em-estuarios-da-avaliacao-da-perigosidade-a-gestao-critica/>).

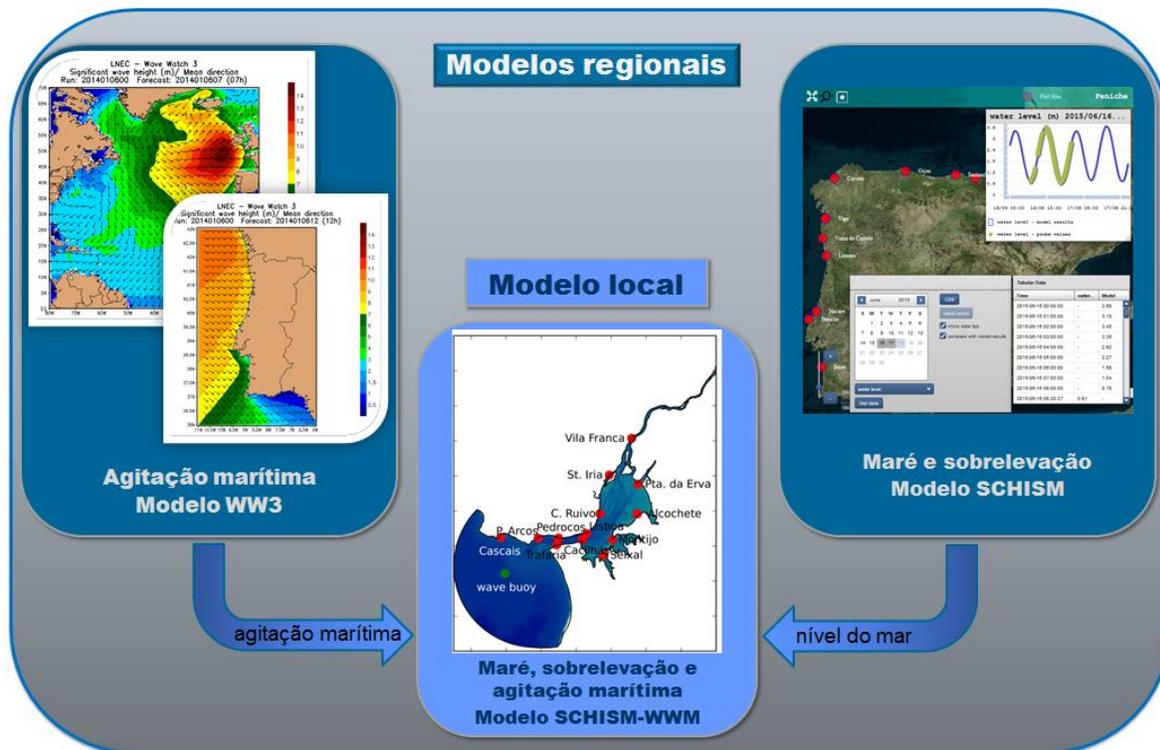


Figura 1. Esquema geral dos modelos. As figuras do modelo de agitação marítima mostram previsões da altura significativa das ondas no início de janeiro de 2014 (tempestade Hércules). A figura do modelo regional de maré e sobre-elevação mostra um aspeto da interface (<http://ariel.lnec.pt>). A figura do estuário do Tejo mostra a batimetria, o domínio de cálculo e as estações maregráficas utilizadas na validação do modelo em modo *hindcast*.

Este artigo começa por apresentar o sistema de previsão em tempo real do LNEC. De seguida, apresentam-se os vários modelos que constituem o sistema de previsão dos níveis: o modelo regional de agitação marítima para a costa Portuguesa, operacional desde 2010; o modelo regional de níveis do mar, operacional desde março de 2015; e o modelo de circulação e agitação marítima para o estuário do Tejo, também operacional desde março de 2015. Finalmente, descreve-se a plataforma informática e a interface com o utilizador.

2. WIFF - O SISTEMA DE PREVISÃO EM TEMPO REAL DO LNEC

Os sistemas de previsão em tempo real produzem previsões a escalas de tempo curtas (dias), através da integração de modelos numéricos e dados de campo. São hoje ferramentas habituais de suporte à gestão costeira e portuária para análise de grandezas como a agitação marítima, os níveis e as velocidades (Baptista, 2006, Ribeiro *et al.*, 2011, Wernera *et al.*, 2013).

O sistema de previsão em tempo real utilizado neste trabalho é parte da plataforma WIFF-*Water Information Forecast Framework*, e é baseado na aplicação de uma plataforma genérica, adaptável a qualquer localização geográfica, que foi customizado no LNEC para aplicações costeiras e suas interfaces urbana (Jesus *et al.*, 2012). O sistema integra um conjunto de modelos numéricos que corre diariamente em ambientes de elevada performance (Oliveira *et al.*, 2015). A plataforma WIFF foi desenvolvida inicialmente para simular processos físicos, tendo sido estendido recentemente para a contaminação fecal em sistemas de drenagem e estuários (Rodrigues *et al.*, 2013) e derrames de hidrocarbonetos (Oliveira *et al.*, 2014).

A plataforma WIFF corre num sistema operativo Linux e é composta por um núcleo de *scripts* que são desencadeados diariamente de forma automática e que preparam e lançam as simulações de cada modelo de previsão. Estes *scripts* interagem com bases de dados PostgreSQL para recolher os dados de campo e as previsões forçadoras ao sistema em estudo. Em aplicações em que vários modelos são executados e que os resultados dos primeiros modelos servem de forçamento ao modelo seguinte na cadeia de previsão, estes *scripts* tratam ainda da conversão entre formatos. O *workflow* de procedimentos para a aplicação ao estuário do Tejo aqui apresentado é ilustrado na Figura 2.

Cada aplicação do WIFF é validada automaticamente por comparação com dados *online* em tempo real, medidos na rede de monitorização do LNEC ou disponibilizados por outras entidades, permitindo aos utilizadores aferir permanentemente os produtos.

De forma a garantir a disponibilidade diária das previsões para suportar a gestão das zonas costeiras e emitir alertas, foi dedicada especial atenção à robustez e resiliência do WIFF. Assim, as várias aplicações do sistema de previsão são operadas de forma redundante em várias *workstations* e nós do *cluster* MEDUSA (integrado na Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída - INCD). A possibilidade de falhas é devidamente acautelada através do controle automático da adequação e qualidade dos forçamentos, sendo possível iniciar automaticamente as simulações mesmo quando os forçamentos do dia não estão disponíveis, através de mecanismos de recuperação dos forçamentos disponibilizados nos dias anteriores ao período de interesse. Os resultados das simulações são disponibilizados através de interfaces Web (descritas abaixo) e arquivados automaticamente em servidores de *backup*.

O LNEC dispõe assim de um portfolio de vários anos de previsões em tempo real para a costa Portuguesa da agitação marítima e da circulação, os quais permitem agora a análise retrospectiva da sua qualidade, por comparação com os dados para o mesmo período.

3. MODELAÇÃO REGIONAL DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

Os campos de ondas são gerados com a versão 3.14 do modelo espectral de ondas de terceira geração WAVEWATCH III (Tolman, 2009), desenvolvido no NCEP/NOAA. O domínio utilizado cobre o Atlântico Norte, de 0° a 70°N em latitude e de 0° a 80°W em longitude, com uma resolução de 0.5° (Figura 1). Uma malha encaixada com uma resolução de 0.05° é depois utilizada para a plataforma continental Portuguesa (Figura 1). O espectro de ondas é dividido em 24 direções e 25 frequências (Dodet *et al.*, 2010). A batimetria foi construída a partir da

topografia global do fundo do mar gerada a partir de dados de satélite e sondagens de Smith e Sandwell (1997). As simulações são forçadas com campos de vento provenientes das previsões do GFS (*Global Forecast System*, <https://www.ncdc.noaa.gov>) a 10 metros, com uma resolução espacial de 1.875° e uma resolução temporal de 6 horas. A aplicação está descrita em maior detalhe em Ribeiro *et al.* (2012).

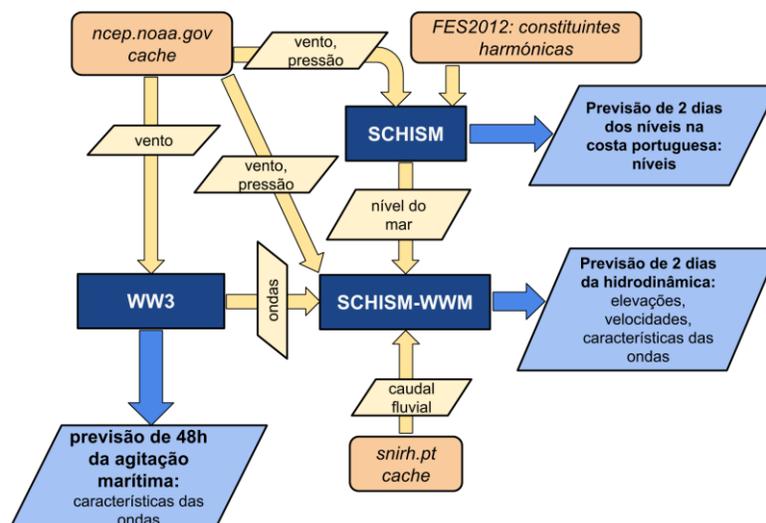


Figura 2. Workflow de procedimentos para a previsão em tempo real da circulação acoplada ondas-correntes no estuário do Tejo.

Esta aplicação está operacional desde 2011, produzindo diariamente previsões de 48 horas que são comparadas de forma automática com os dados *online* de agitação marítima das boias disponíveis ao longo da costa Portuguesa: Leixões, Lisboa, Sines e Faro. Com vista a avaliar a precisão das previsões, determinaram-se os erros nestas quatro boias ondógrafo, para um período de cerca de quatro anos, entre 2011 e 2015. Calcularam-se os erros quadráticos médios (EQM), os EQM normalizados pela média das observações (EQMN) e o viés (Figura 3).

Os resultados mostram o excelente desempenho do modelo na costa oeste de Portugal (Leixões, Lisboa e Sines), onde os erros são da ordem de grandeza de modelos de *hindcast* (e.g., Dodet *et al.*, 2010). O modelo tende a subestimar as alturas significativas em 10 a 20 cm, mas consegue reproduzir corretamente mesmo as ondas mais energéticas. Na costa sul (bóia de Faro) os erros são mais importantes e, em particular, as alturas significativas das ondas são frequentemente subestimadas. Este comportamento está porventura relacionado com a baixa resolução do campo de ventos, que não permite reproduzir com precisão a geração de ondas no golfo de Cádiz.

A comparação entre as previsões feitas para o próprio dia e para o dia seguinte apresenta diferenças pouco significativas. Dado que os ventos forçadores são fornecidos algumas vezes com atrasos, esta pequena diferença permite dar confiança no uso das previsões para além do próprio dia. Permite ainda efetuar previsões fiáveis em caso de falha das previsões

meteorológicas, utilizando a simulação do dia anterior para produzir as condições iniciais da simulação do dia seguinte, conferindo robustez ao sistema de previsão e resiliência a falhas. Assim, o período de previsão irá ser estendido para o período de forçamento de vento disponível.

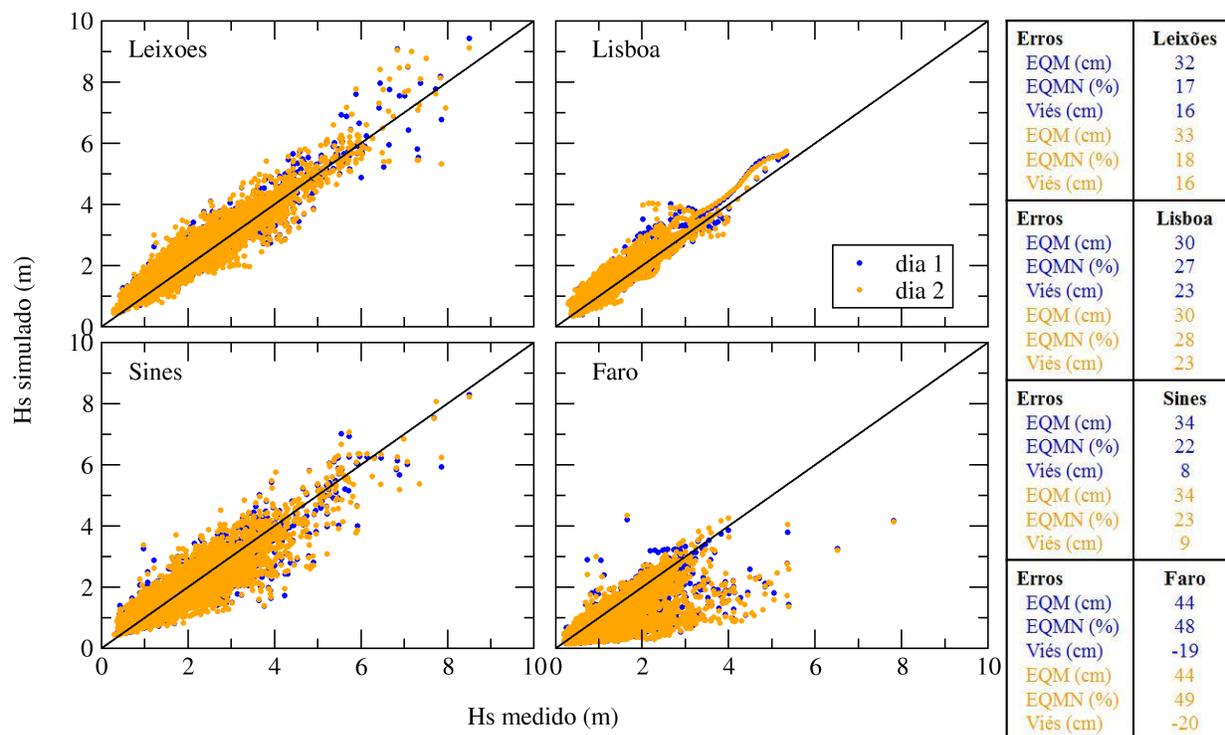


Figura 3. Validação das previsões de agitação marítima entre 2011 e 2015 em quatro boias ondógrafo Portuguesas: comparação entre as medições e as previsões para o próprio dia (dia 1, azul) e para o dia seguinte (dia 2, laranja); erros quadráticos médios (EQM), EQM normalizados (EQMN) e viés das previsões.

4. MODELAÇÃO REGIONAL DO NÍVEL DO MAR

As simulações são realizadas com o sistema de modelação SCHISM (<http://ccrm.vims.edu/schism/>). Este sistema de modelos deriva do modelo SELFE (Zhang e Baptista, 2008) e tem vindo a ser desenvolvido em várias instituições, lideradas pelo *Virginia Institute of Marine Sciences*. O SCHISM (*Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model*) é um sistema de código aberto baseado em malhas não estruturadas, vocacionado para a simulação tridimensional baroclínica a escalas que vão do rio ao oceano. Utiliza métodos semi-implícitos de elementos e volumes finitos combinados com algoritmos Eulerianos-lagrangianos para resolver as equações de águas pouco profundas. É totalmente paralelizado, e inclui módulos de agitação marítima, qualidade da água e morfodinâmica (e.g., Rodrigues *et al.*, 2009, 2011, Pinto *et al.*, 2012).

O SCHISM é aplicado num vasto domínio que cobre uma parte significativa do Atlântico Nordeste. A resolução é particularmente fina na costa Portuguesa, onde atinge perto de 250 m. O modelo é forçado nas fronteiras oceânicas por resultados do modelo global de maré FES2012 (Carrère *et al.*, 2012) e pelo efeito do barómetro inverso. No interior do domínio, o modelo é forçado pelo potencial de maré, pela pressão atmosférica e pelo vento, estes últimos obtidos das previsões do GFS. Efetuam-se simulações de 48 horas com 8 processadores, o que demora cerca de 15 minutos de computação. Descrições mais detalhadas da aplicação e validação deste modelo em modo *hindcast* são apresentadas em Fortunato *et al.* (2014, em revisão).

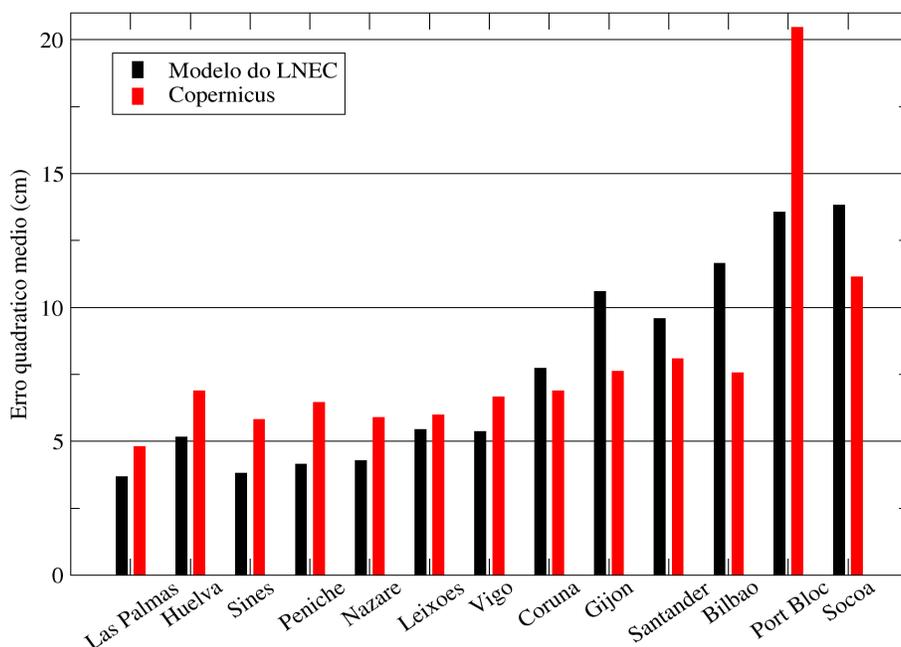


Figura 4. Validação do modelo regional de marés e sobre-elevações de origem meteorológica: erros quadráticos médios obtidos para as previsões de março a maio de 2015 com o presente modelo e o modelo do Programa Europeu Copernicus.

O modelo está operacional desde março de 2015. Os resultados das previsões para março – maio de 2015 foram comparados com medições em vários marégrafos em Portugal, Espanha e França (Figura 4). Para comparação, calcularam-se também os EQM obtidos com as previsões do modelo regional da Ibéria, Biscaia e Irlanda disponíveis no sítio do Programa Europeu Copernicus (<http://marine.copernicus.eu/>), e que eram usados para forçar modelos locais anteriores (e.g., Oliveira *et al.*, 2014). Os EQM são da ordem de 5 cm ao longo da costa portuguesa, aumentando progressivamente para norte no Golfo da Biscaia. Ao longo da costa portuguesa e mais a sul (estações de Las Palmas e Huelva), o presente modelo é mais preciso do que o modelo do Copernicus. Pelo contrário, o modelo do Copernicus é mais preciso no Golfo da Biscaia. Esta discrepância pode estar relacionada com o maior refinamento do presente modelo na costa portuguesa. O presente modelo é também sensivelmente mais preciso em Port Bloc, localizado na embocadura do Rio Gironda. Atribui-se o pior desempenho

do modelo do Copernicus à utilização de malhas estruturadas, que não permitem reproduzir os detalhes da geometria desta embocadura.

5. MODELAÇÃO LOCAL

As simulações são efetuadas com o modelo SCHISM-WWMII (Roland *et al.*, 2012). Este modelo consiste no acoplamento entre o modelo de circulação SCHISM, descrito anteriormente, e o modelo espectral de ondas WWM. Os dois modelos partilham a mesma malha, não-estruturada, e a partição do domínio pelos diferentes processadores. O modelo de circulação fornece os níveis e as velocidades, e recebe os gradientes das tensões de radiação. Estas informações são trocadas ao nível da memória, o que contribui para a eficiência.

A aplicação do modelo evoluiu de aplicações anteriores (Guerreiro *et al.*, 2015) com melhorias substanciais na representação da geometria e na inclusão da agitação marítima. O domínio de cálculo estende-se por cerca de 120 km, cobrindo uma zona costeira com um raio de cerca de 30 km, e prolonga-se para montante até perto de Santarém (Figura 1). Lateralmente, a malha estende-se pelo menos 50 m para o exterior da Linha de Máxima Preia-Mar de Águas Vivas Equinociais definida em Rilo *et al.* (2014). Entre Cacilhas e o Montijo incluem-se também todas as zonas marginais potencialmente inundáveis, definidas pela cota altimétrica dos 5 m (Figura 5). A topo-hidrografia foi construída com base nos levantamentos batimétricos mais recentes do Porto de Lisboa, em dados de LIDAR das margens costeiras, em dados topo-hidrográficos e das margens estuarinas fornecidos pela ARH do Tejo, e em topografia de alta resolução da Direção-Geral do Território. A resolução espacial da malha é variável, entre 1 km e tipicamente 10 a 30 m junto às margens (Figura 5). O coeficiente de atrito no leito é definido com base nos sedimentos de fundo (Guerreiro *et al.*, 2015), enquanto nas margens é baseado na ocupação do solo (Chen *et al.*, 2015).

O modelo não foi calibrado, mas validado em modo *hindcast* e *forecast*. Efetuaram-se simulações de *hindcast* para 1972, com forçamento de maré e caudal fluvial. Os resultados foram comparados com séries sintéticas determinadas a partir dos dados de 1972 de 13 marégrafos distribuídos em todo o estuário. Os resultados mostram a excelente precisão do modelo, com EQM da ordem de 4-16 cm em todo o estuário (Figura 6).

O modelo em modo de previsão foi validado por comparação com dados de níveis medidos numa estação de monitorização instalada no antigo Cais da Transtejo da baía do Seixal equipada com um sensor Level Troll 700 para medição de níveis (Figura 7). A estação de monitorização foi devidamente georeferenciada, tendo-se utilizado um DGPS Topcon HiperPro. Os dados foram adquiridos entre 20 e 31 de março de 2015 com intervalos de 10 minutos. A precisão do modelo em modo operacional é muito boa, com um EQM de 13 cm no Seixal (Figura 8).

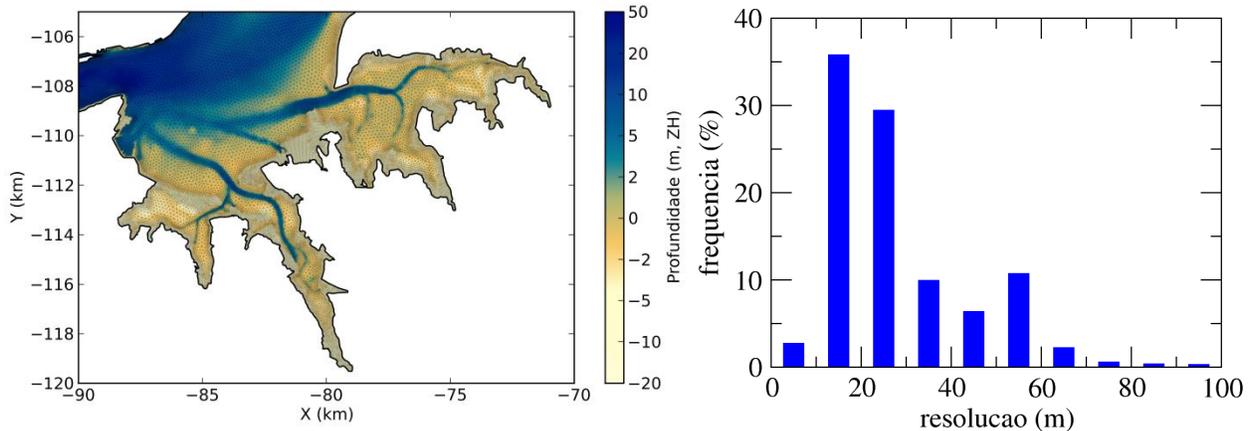


Figura 5. Modelo do estuário do Tejo: detalhe da malha e batimetria na zona do Seixal (esquerda); resolução horizontal da malha (direita).

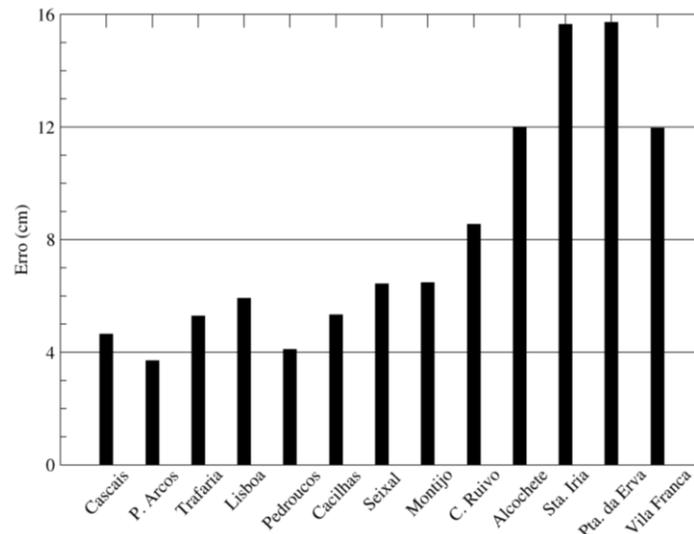


Figura 6. Validação do modelo do Tejo em modo hindcast. Erros quadráticos médios em 13 estações maregráficas. As estações estão indicadas na Figura 1.



Figura 7. Estação de monitorização no antigo Cais da Transtejo do Seixal (X= -84489.407; Y= -113102.754, ETRS89 TM-06) e vista do Cais.

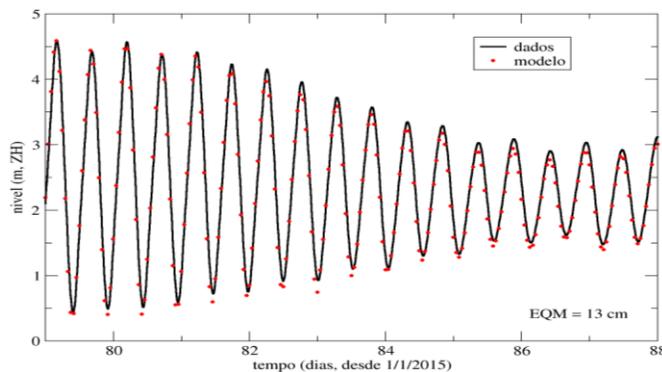


Figura 8. Validação do modelo do Tejo em modo operacional: comparação entre observações e resultados na estação do Seixal.

6. PLATAFORMA WEB DE ACESSO AOS PRODUTOS DE PREVISÃO

Objetivos da plataforma

Os resultados das previsões em tempo real, assim como as comparações com os dados existentes *online*, são disponibilizados através de uma plataforma *WebGIS*, que permite aceder à informação em qualquer dispositivo fixo ou móvel. Esta plataforma é baseada no sistema WIFF (Oliveira *et al.*, 2014), tendo sido adaptada para cumprir os seguintes requisitos:

- Disponibilizar acesso rápido aos resultados de monitorização, previsão e análise de risco.
- Permitir o acesso em qualquer dispositivo e localização, desde que tenha ligação à internet.
- Permitir acessos diferenciados consoante o papel do utilizador no processo de gestão do risco e da emergência.
- Contribuir para uma mobilização coordenada e rápida de agentes de emergência e outras entidades gestoras em resposta a eventos de inundação, permitindo ainda a partilha de informação entre agentes no terreno e os centros de coordenação de emergência.
- Ser modular e flexível, para poder ser aplicada em outros sistemas costeiros e urbanos, com poucas modificações.

Front-end e back-end

Esta plataforma foi desenvolvida com base nas plataformas criadas para vários projetos (e.g. SPRES – <http://www.Inec.pt/hidraulica-ambiente/pt/projectos/detalhe/spres-oil-spill-prevention-and-response-at-local-scales/>), integrando novas tecnologias *web* para maior flexibilidade, robustez e fiabilidade. A plataforma é alimentada com resultados do sistema de previsão de inundação e dados da rede de sensores remotos.

A plataforma é composta por duas partes claramente separadas (Figura 9): o *back-end*, a executar do lado do servidor, onde são executadas as simulações e recolhidos, tratados e armazenados os dados de monitorização e resultados da previsão; e o *front-end*, a executar do lado do cliente, onde é feita a interação com o utilizador final e é apresentada a informação

disponibilizada pelo *back-end*. Esta separação de conceitos, entre as duas componentes do sistema, é conseguida através da comunicação via pedidos e *webservices* REST. REST é um conjunto de princípios na arquitetura de sistemas utilizado para separar a parte que produz e serve dados da parte que os consome (o utilizador final). Esta separação oferece dois tipos de funcionalidades:

1. a troca do tipo de produtos disponibilizados pelo servidor sem que isso influencie o correto funcionamento da interface. O *front-end* é independente do conteúdo disponibilizado pelo *back-end*, não dependendo do tipo de dados para funcionar corretamente.
2. a possibilidade de vários clientes (aplicações móveis, páginas *web* ou outros *webservices*) consumirem os dados disponibilizados pelo servidor.

O *back-end* é composto por uma instância de *CakePHP*, uma *framework* MVC PHP, uma base de dados PostgreSQL (para armazenamento não-volátil de informação), com extensão PostGIS para armazenamento de dados geográficos, várias instâncias de *Geoserver* e *scripts* Perl e Python. O código PHP gere o controlo e acesso de utilizadores aos dados servidos para o *front-end* e mantém a ligação entre os vários componentes do *back-end*. O *Geoserver*, um servidor de código aberto para partilha de informação geográfica, gere e disponibiliza imagens geo-referenciadas em formatos normalizados (como por exemplo WMS) para que também esta informação possa ser utilizada por diferentes clientes. Este servidor geográfico disponibiliza informação armazenada em base de dados PostgreSQL/PostGIS e resultados dos modelos de previsão em formato *shapefile*, permitindo assim explorar os resultados do modelo com maior detalhe (por exemplo através da extração de séries temporais em pontos seleccionados pelo utilizador na interface *WebGIS*).

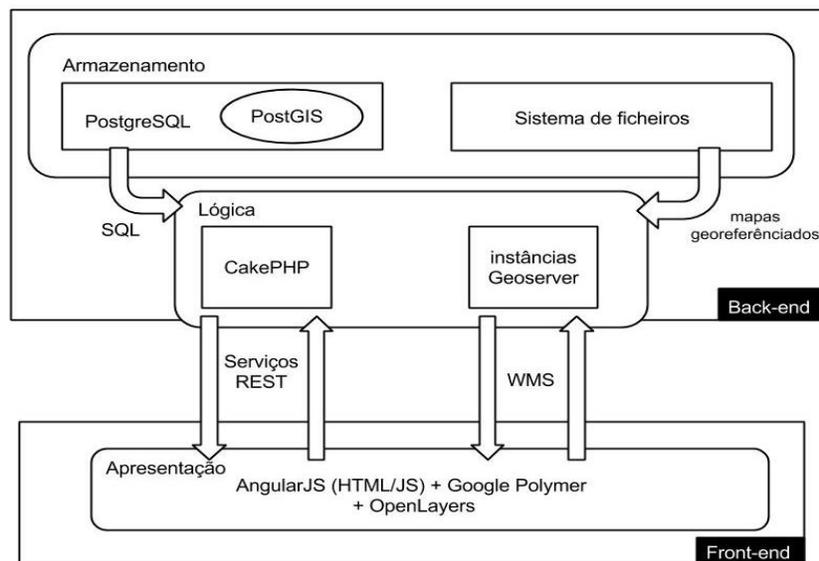


Figura 9. Fluxo de informação entre o *front-end* e o *back-end*.

O *front-end* consiste numa aplicação *web*, adaptável a vários dispositivos, que permite ao utilizador final visualizar e interagir com os resultados disponibilizados pelo *back-end* numa interface simples e intuitiva. Com o objetivo de chegar a vários dispositivos com menor capacidade de processamento, como *tablets* e *smartphones*, escolheram-se tecnologias *web* recentes com menor necessidade de processamento do que as tecnologias utilizadas em projetos anteriores (Gomes *et al.*, 2013). Estas tecnologias incluem: *HTML5* e *CSS3* como base para todas as aplicações *web*; *AngularJS*, uma *framework javascript* que oferece um sistema dinâmico de *templating* e *two-way databinding*; *Google Polymer*, uma implementação de padrões de design visual definidos pela Google, e *OpenLayers*, uma biblioteca que permite manipular informação geo-referenciada (p.e. servida pelo *Geoserver*) e que fornece ferramentas para manusear mapas do lado do cliente.

A comunicação entre *front-end* e *back-end* é feita através de serviços REST. As respostas a estes pedidos vêm em JSON, um formato de troca de informação fácil de ler e escrever por humanos e de analisar e criar por computadores.

O fluxo de informação do lado do *back-end* foi desenvolvido tendo em vista facilitar a recolha de dados da rede de sensores remotos, utilizar esta informação como *inputs* para os modelos de previsão, analisar e armazenar a informação relevante em base de dados (dados e resultados de previsão) e por fim fornecer os resultados da previsão ao utilizador final.

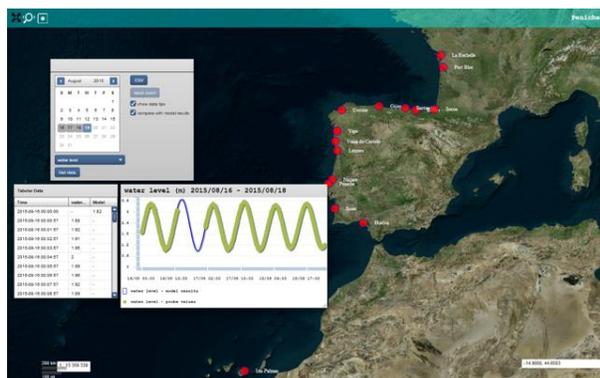
Funcionalidades da plataforma WebGIS do projeto MOLINES

Esta plataforma (Figura 10) está organizada ao longo dos principais eixos do projeto: previsão em tempo real e alerta, análise de risco e acesso a dados em tempo real (Freire *et al.*, 2015).

A zona destinada à previsão em tempo real utiliza as *layers* WMS em formato *shapefile*, e disponibiliza-as geo-referenciadas num mapa com funcionalidades de zoom e de ligar, desligar e sobrepor *layers*. As previsões são agrupadas por dias e disponibilizadas em cada hora. Existe ainda uma componente da interface destinada aos produtos de análise de risco que utiliza as mesmas tecnologias e fornece o mesmo tipo de interações com os resultados.

Na área para acesso a dados em tempo real é oferecida ao utilizador a possibilidade de visualizar dados em tempo real e de os comparar com as previsões, em formato gráfico e tabelar, e de fazer *download* desta informação em formato CSV. Desta forma o utilizador tem acesso a uma representação gráfica e intuitiva e pode trabalhar os dados em bruto, se assim o desejar, utilizando outras aplicações à sua escolha. No futuro poderão ainda ser definidos alarmes personalizados. Estes serão despoletados quando determinados limiares forem atingidos, e serão enviados automaticamente por correio eletrónico.

a)



b)



Figura 10. Exemplos de produtos na plataforma: a) comparação dados/previsões; b) previsão de alturas significativas.

7. CONCLUSÕES

Apresentou-se um novo sistema de previsão de riscos de inundação para a costa Portuguesa, baseado numa aplicação do sistema genérico de previsão em tempo real do LNEC - WIFF. O sistema é preciso, robusto e extensível a outras regiões através do desenvolvimento de novos modelos locais. Os seus resultados são disponibilizados às entidades gestoras através de uma plataforma *WebGIS*, acessível em qualquer dispositivo móvel ou fixo. A qualidade das previsões foi analisada através do portfolio de previsões e das séries de dados disponíveis, assim como pela comparação com outros modelos.

Este sistema continuará a ser aperfeiçoado através da melhoria dos modelos, da inclusão de novos modelos locais, e do aumento dos períodos de previsão, assim como dos serviços providenciados pela interface. Serão desenvolvidos critérios objetivos de risco, de forma a providenciar alertas automáticos às autoridades.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, projeto Molines (PTDC/AAG-MAA/2811/2012). A última autora foi co-financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (bolsa SFRH/BPD/87512/2012). Os autores agradecem ainda ao Porto de Lisboa e ao Instituto Hidrográfico pela disponibilização *online* dos dados de agitação marítima nos respetivos portais e através do portal EMODNET.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baptista, A.M. (2006). CORIE: the first decade of a coastal-margin collaborative observatory. Oceans'06, MTS/ IEEE, Boston, MA.
- Bertin X., Bruneau N., Breilh J.-F., Fortunato A.B., Karpytchev M. (2012). Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay, *Ocean Modelling* 42/1: 16 - 30.

- Carrère L., Lyard F., Cancet M., Guillot A., Roblou L. (2012). FES2012: A new global tidal model taking taking advantage of nearly 20 years of altimetry, Proceedings of meeting "20 Years of Altimetry".
- Chen J., Chen J., Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Peng S., Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J. (2015). Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7–27
- Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J., Holthuijsen L.H., Dawson C., Luettich R.A. Jr., Jensen R.E., Smith J.M., Stelling G.S., Stone G.W. (2011). Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations, *Coastal Engineering*, 58/1: 45-65.
- Dodet G., Bertin X., Taborda R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31/3-4: 120-131.
- Fortunato, A.B., Li K., Bertin X., Rodrigues M. (2014). Determination of extreme sea levels along the Portuguese coast, *3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 151-154.
- Fortunato A.B., Li K., Bertin X., Rodrigues M., Miguez B.M. (em revisão). Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast, *Ocean Engineering*.
- Freire P., Tavares A.O., Fortunato A.B., Sá L., Oliveira A., Rilo A., Santos P.P., Gomes J. (2015). Modelação da inundação em estuários. Da avalia o da perigosidade   gestão crítica, *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*.
- Gomes J.L., Jesus G., Rodrigues M., Rogeiro J., Azevedo A., Oliveira A. (2013). Managing a Coastal Sensors Network in a Nowcast-forecast Information System, *Proc. of the Sixth Int. Workshop on Next Generation of Wireless and Mobile Networks (NGWMN-2013)*, 6 pp.
- Guerreiro M., Fortunato A.B., Freire P., Rilo A., Taborda R., Freitas M.C., Andrade C., Silva T., Rodrigues M., Bertin X., Azevedo A. (2015). Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15/1: 65-80.
- Jesus G., Gomes J., Ribeiro N.A., Oliveira A. (2012). Custom deployment of a Nowcast-forecast information system in coastal regions, *Geomundus 2012*.
- Oliveira A., Jesus G., Gomes J.L., Rogeiro J., Azevedo A., Rodrigues M., Fortunato A.B., Dias J.M., Tomás L.M., Vaz L., Oliveira E.R., Alves F.L., Boer S.d. (2014). An interactive WebGIS observatory platform for enhanced support of integrated coastal management, *Journal of Coastal Research*, S.I. 70: 507 - 512.
- Oliveira A., Rogeiro J., Azevedo A., Fortunato A.B., Tavares da Costa R., Rodrigues M., Li K., Martins J.P., David M., Pina J., Gomes J. (2015). Sistema multi-escala de previsão em tempo real da dinâmica estuarina e costeira: desafios para a sua operacionaliza o em ambiente *Cloud* e de elevada performance, *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*.
- Pinto L., Fortunato A.B., Zhang Y., Oliveira A., Sancho F.E.P. (2012). Development and validation of a three-dimensional morphodynamic modelling system for non-cohesive sediments, *Ocean Modelling*, 57-58: 1-14.
- Ribeiro N.A., Fortunato A.B., Rocha A.C. (2012). Efeito das altera es climáticas no regime de agita o marítima no Atlântico Norte e costa portuguesa, *2^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 163-166.

- Rilo A., Freire P., Mendes R.N., Ceia R., Catalão J., Taborda R., Melo R., Caçador M.I., Freitas M.C., Fortunato A.B., Alves E. (2014). Methodological framework for the definition and demarcation of the highest astronomical tide line in estuaries: the case of Tagus Estuary (Portugal), *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 14(1): 95-107.
- Rodrigues M., Oliveira A., Queiroga H., Fortunato A.B., 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.
- Rodrigues M., Costa J., Jesus G., Fortunato A.B., Rogeiro J., Gomes J., Oliveira A., David L.M. (2013). Application of an estuarine and coastal nowcast/forecast information system to the Tagus estuary. Proceedings of the 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research (Lisboa, Portugal), 10 pp.
- Roland A., Zhang Y.J., Wang H.V., Meng Y., Teng Y.-C., Maderich V., Brovchenko I., Dutour-Sikiric M., Zanke U. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids, *Journal of Geophysical Research*, 117, C00J33.
- Smith W.H.F., Sandwell D.T. (1997). Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, v. 277: 1957-1962.
- Tolman H.L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III, version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 p.
- Wernera M., Schellekens J., Gijssbers P., van Dijkstra M., van den Akker O., Heynert K. (2013). The Delft-FEWS flow forecasting system”, *Environmental Modelling & Software*, 40, 65-77.
- Zhang Y., Baptista A.M. (2008). SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation, *Ocean Modelling*, 21(3-4), 71-96.