



ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À INCERTEZA DOS FORÇAMENTOS NA PREVISÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TEMPO REAL

Marta RODRIGUES¹; João ROGEIRO²; Luís M. DAVID³; André B. FORTUNATO⁴;
Anabela OLIVEIRA⁵

1 – Eng.ª do Ambiente, Doutora em Biologia; Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; mfrodrigues@lnec.pt, 218443613

2 - Eng. Informático; Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; jrogeiro@lnec.pt, 218443748

3 - Eng. Civil, Doutor em Eng. Civil; Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; ldavid@lnec.pt, 218443839

4 - Eng. Civil, Doutor em Eng.ª do Ambiente; Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; afortunato@lnec.pt, 218443425

5 - Eng.ª Civil, Doutora em Eng.ª do Ambiente; Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; aoliveira@lnec.pt, 218443631

Resumo

Os sistemas de previsão e monitorização em tempo real constituem ferramentas inovadoras para a gestão otimizada da água em meios estuarinos e costeiros. O LNEC desenvolveu uma plataforma para a gestão em tempo real dos meios aquáticos, baseada na WIFF . *Water Information and Forecast Framework*. Esta plataforma foi recentemente alargada para a previsão da qualidade da água no estuário do Tejo. O sistema de previsão do estuário do Tejo baseia-se na aplicação do modelo hidrodinâmico e de qualidade da água ECO-SELFE, forçado por previsões oceânicas, fluviais, atmosféricas e da rede drenagem urbana. Este sistema disponibiliza previsões de níveis, velocidades, salinidade, temperatura e indicadores microbiológicos para um período de 48 horas, tendo a sua utilidade sido demonstrada no apoio à gestão da qualidade da água. Persistem, no entanto, vários desafios na previsão em tempo real da qualidade da água. Quantificar e reduzir a incerteza associada ao processo de modelação em cascata é fundamental para melhorar a precisão das previsões. Em particular, é essencial perceber quais os forçamentos chave cuja precisão poderá pôr em questão a qualidade das previsões. Assim, procede-se a uma análise de sensibilidade da influência dos forçamentos nas previsões da circulação e da qualidade da água no estuário do Tejo. A abordagem utilizada consiste na definição de cenários realistas para os forçamentos oceânico, fluvial, atmosférico e das descargas urbanas, e na comparação das previsões obtidas em cada um destes cenários com as previsões do modelo implementado em tempo real para o período de um ano (2013/2014). Os resultados sugerem uma influência significativa do caudal fluvial e do forçamento atmosférico nas previsões de salinidade e de temperatura, respetivamente. Estes forçamentos influenciam também significativamente a concentração dos indicadores microbiológicos, com uma maior influência do caudal fluvial a montante e do forçamento atmosférico a jusante, e uma influência local das descargas.

13.º Congresso da Água

Palavras-chave: Sistemas de previsão em tempo real, Incerteza, Modelação numérica, Salinidade, Indicadores microbiológicos, Estuário do Tejo

Tema: Inovação e tecnologias de informação e de comunicação na gestão da água.

1. INTRODUÇÃO

A garantia da qualidade das águas estuarinas e costeiras é uma necessidade estabelecida a nível nacional e Europeu (e.g. DQA . Diretiva Quadro da Água, DAB . Diretiva das Águas Balneares), constituindo os sistemas de monitorização e previsão em tempo real ferramentas inovadoras no apoio à gestão otimizada destes meios aquáticos. A DAB (Diretiva 2006/7/CE), por exemplo, prevê a criação e manutenção de sistemas de vigilância e de alerta rápido que permitam identificar incidentes de contaminação que possam ter um efeito adverso na qualidade das águas balneares, nomeadamente os resultantes de condições climáticas extremas.

Os sistemas de previsão e monitorização em tempo real permitem a vigilância contínua, a antecipação de situações de contaminação a escalas temporais curtas e a adoção atempada de medidas de prevenção, de forma a minimizar potenciais impactes negativos associados às atividades humanas ou a fatores climáticos. Estes sistemas são hoje ferramentas habituais de suporte à gestão costeira para análise de grandezas como os níveis e as velocidades (e.g. http://www.opc.ncep.noaa.gov/Current_fcasts.shtml), mas a sua utilização como instrumentos de suporte à gestão da qualidade da água é ainda recente (e.g. Thoe et al., 2012; Rodrigues et al., 2013; Bedri et al., 2014; Oliveira et al., 2014).

Nos últimos anos, o LNEC desenvolveu uma plataforma para a gestão em tempo real dos meios aquáticos, que inclui vários sistemas de previsão, baseada na WIFF . *Water Information and Forecast Framework* (Oliveira et al., 2014). Os primeiros sistemas de previsão desta plataforma focaram-se na previsão da circulação em estuários nacionais e da agitação marítima na costa Portuguesa (<http://ariel.lnec.pt>). Recentemente, a plataforma evoluiu significativamente nas suas funcionalidades, passando a integrar redes de monitorização em tempo real, arquivo histórico, uma interface *web* (WebSIG) para a visualização dos resultados através da internet, e a previsão de variáveis indicadoras da qualidade da água (Rodrigues et al., 2013; David et al., 2014; Oliveira et al., 2014). Em particular, esta plataforma foi recentemente alargada para a previsão de indicadores de qualidade da água no estuário do Tejo, disponibilizando previsões de níveis, velocidades, salinidade, temperatura, coliformes fecais e *Escherichia coli* (*E. coli*) para um período de 48 horas (Rodrigues et al., 2013; David et al., 2014).

Persistem, no entanto, vários desafios na previsão em tempo real da qualidade da água, associados à complexidade da integração de modelos com diferentes escalas temporais e espaciais, e à escassez de dados para validar em tempo real as previsões de qualidade da água. A confiabilidade dos sistemas de previsão é, assim, limitada pela precisão dos modelos numéricos e pelas condições da sua aplicação (e.g. forçamentos), i.e., pela incerteza associada às previsões. Estas questões são particularmente complexas na modelação operacional da qualidade da água, pela diversidade das componentes envolvidas, nomeadamente a abordagem de modelação em cascata, na qual os resultados de um modelo são usados para forçar o seguinte na cadeia de modelos, potenciando a transferência de imprecisões e até a sua amplificação.

Assim, no presente estudo procede-se à análise da incerteza associada aos forçamentos nas previsões em tempo real da circulação e da qualidade da água, de particular relevância nas simulações de modelos em cascata. A abordagem desenvolvida consiste na definição de um conjunto de cenários para os forçamentos (e.g. oceânico, fluvial, atmosférico) e na análise de sensibilidade das previsões a estes forçamentos, através da comparação das previsões obtidas em cada um dos cenários estabelecidos com as previsões do modelo implementado em tempo real. Esta análise é realizada para o sistema piloto do estuário do Tejo para o período de um ano.

Seguidamente descreve-se sumariamente a metodologia adotada. Na secção 3 descreve-se o sistema de previsão da circulação e da qualidade da água do estuário do Tejo e os seus desenvolvimentos recentes. Os resultados da influência dos forçamentos nas previsões em tempo real são analisados e discutidos na secção 4. Por fim, apresentam-se as principais conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuras.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada consistiu numa análise de sensibilidade à influência dos forçamentos nos resultados do modelo de previsão e incluiu: i) a definição de um conjunto de cenários dos forçamentos relevantes para o sistema de previsão em tempo real em análise (e.g. forçamento oceânico, caudal fluvial), ii) a simulação destes cenários usando o modelo ECO-SELFE, e iii) a comparação das previsões obtidas para cada um dos cenários estabelecidos com as previsões do modelo implementado em modo operacional. A análise comparativa dos resultados obtidos nos cenários simulados baseou-se na comparação das previsões com observações e no cálculo dos erros associados, em estatística descritiva e na determinação de desvios entre cenários. A comparação dos resultados com observações incluiu dados disponíveis em tempo *quasi*-real e dados obtidos em campanhas de campo tradicionais. A determinação dos desvios entre os vários cenários foi realizada num conjunto de estações virtuais definidas ao longo do domínio de estudo, as quais incluem as estações da rede de monitorização existente. Para cada variável, o cálculo do desvio em cada estação foi determinado com base em:

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - C_i|}{n} \quad (1)$$

onde Δ representa o desvio, n o número de previsões, P é a previsão do modelo em modo operacional e C é a previsão para um dado cenário. Para o conjunto de cenários simulados, identificaram-se os desvios máximos em cada estação e o forçamento associado ao desvio máximo.

3. SISTEMA DE OBSERVAÇÃO E PREVISÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NO ESTUÁRIO DO TEJO

3.1 Área de estudo

O sistema de observação e previsão da qualidade da água foi implementado no estuário do Tejo e aplicado de forma piloto à área urbana servida pela estação de tratamento de águas residuais (ETAR) de Alcântara, que compreende a bacia de Alcântara e as bacias servidas pelos sistemas intercetores Algés-Alcântara e Terreiro do Paço-Alcântara.

O estuário do Tejo, localizado na costa oeste de Portugal, é um dos maiores sistemas estuarinos da Europa, com uma área de cerca de 320 km². As suas margens são

13.º Congresso da Água

densamente ocupadas e suportam diversos usos e atividades (e.g. usos urbanos, atividades industriais e portuárias, agricultura, mariscação). Na margem norte, em particular, predominam as áreas urbanas e industriais, as quais representam cerca de 60% da ocupação (Rêilo et al., 2012+). O estuário propriamente dito suporta vários usos recreativos (e.g. canoagem, vela, pesca desportiva) e uma área classificada como Reserva Natural.

A morfologia do estuário do Tejo é complexa, com um canal estreito e profundo na zona da embocadura que alarga para uma bacia interior pouco profunda. A zona entre-marés representa cerca de 43% da área total do estuário (Nogueira Mendes et al., 2012+). As marés são semi-diurnas, com uma amplitude que varia entre 0.6 m e 3.8 m em Cascais (Guerreiro et al., 2015+). A propagação da maré no estuário é complexa, com um aumento da amplitude para montante devido a efeitos de ressonância (Fortunato et al., 1999+). O rio Tejo é a principal origem de água doce no estuário, com um caudal médio de 370 m³/s (Neves, 2010+).

A saída do caneiro de Alcântara no estuário do Tejo corresponde à mais importante descarga urbana na frente ribeirinha da cidade. Em tempo seco, descarrega o efluente tratado da estação de tratamento de águas residuais (ETAR) de Alcântara, que dispõe de uma capacidade de tratamento instalada de 700 000 habitantes equivalente, para um caudal de ponta de 3.3 m³/s em tempo seco e de 6.6 m³/s em tempo de chuva. Em tempo de chuva, descarrega o efluente unitário gerado na maior bacia gravítica da cidade, com cerca de 3200 ha. Ao longo da frente ribeirinha existem diversos descarregadores de tempestade, que em tempo de chuva descarregam o caudal que excede a capacidade de transporte dos sistemas intercetores Algés-Alcântara e Terreiro do Paço-Alcântara.

3.2 WIFF É Water Information and Forecasting Framework

O sistema de observação e previsão em tempo real utilizado neste estudo é parte de uma plataforma de previsão, baseada na WIFF . *Water Information Forecast Framework*. A WIFF é baseada numa *framework* genérica e adaptável a qualquer localização geográfica que foi customizada no LNEC (Jesus et al., 2012+), sendo também ela genérica e adaptável a qualquer localização geográfica. No LNEC a WIFF tem sido tendencialmente utilizada para aplicações costeiras e suas interfaces urbanas. Inicialmente, a plataforma de previsão foi desenvolvida para simular processos físicos, tendo sido recentemente alargada para a previsão de indicadores de contaminação fecal (Rodrigues et al., 2013+) e de derrames de hidrocarbonetos (Oliveira et al., 2014+). O sistema integra um conjunto de modelos numéricos que correm diariamente em ambientes de elevada performance (Rogeiro et al., 2015+).

A WIFF foi desenvolvida para executar em sistemas operativos Linux, sendo composta por um conjunto de *scripts* que são desencadeados diariamente de forma automática e que preparam e lançam as simulações de cada modelo de previsão (Fig. 1). Estes *scripts* integram procedimentos que interagem com bases de dados 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. Os resultados das previsões são disponibilizados *online*, através de um *browser*, com uma interface que possui funcionalidades de SIG, denominada de WebSIG (Oliveira et al., 2014+).

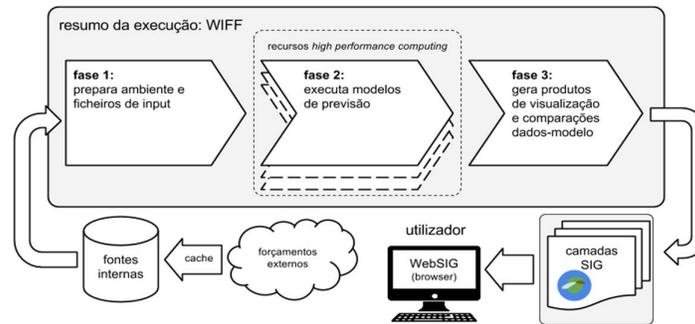


Figura 1. Workflow de um sistema de previsão em tempo real integrado na WIFF.

3.3 Modelação numérica e previsão da qualidade da água no estuário do Tejo

A hidrodinâmica e qualidade da água no estuário do Tejo são simuladas utilizando a versão 3.1d do modelo ECO-SELFE (Rodrigues et al., 2011). O ECO-SELFE foi implementado no estuário do Tejo em modo tridimensional baroclínico. Rodrigues et al. (2013) apresenta uma descrição detalhada da implementação, calibração e validação deste modelo, o qual inclui a descarga do caneiro de Alcântara. No presente estudo, procedeu-se à extensão da aplicação de Rodrigues et al. (2013) para incluir todas as descargas de tempestade relevantes na zona marginal entre Algés e Terreiro do Paço, considerando-se um total de sete descargas (Fig. 2b). A batimetria do domínio de estudo foi também atualizada (Fig. 2a) com base nos dados mais recentes disponíveis, nomeadamente levantamentos do Porto de Lisboa e levantamentos LIDAR das margens (Fortunato et al., 2015).

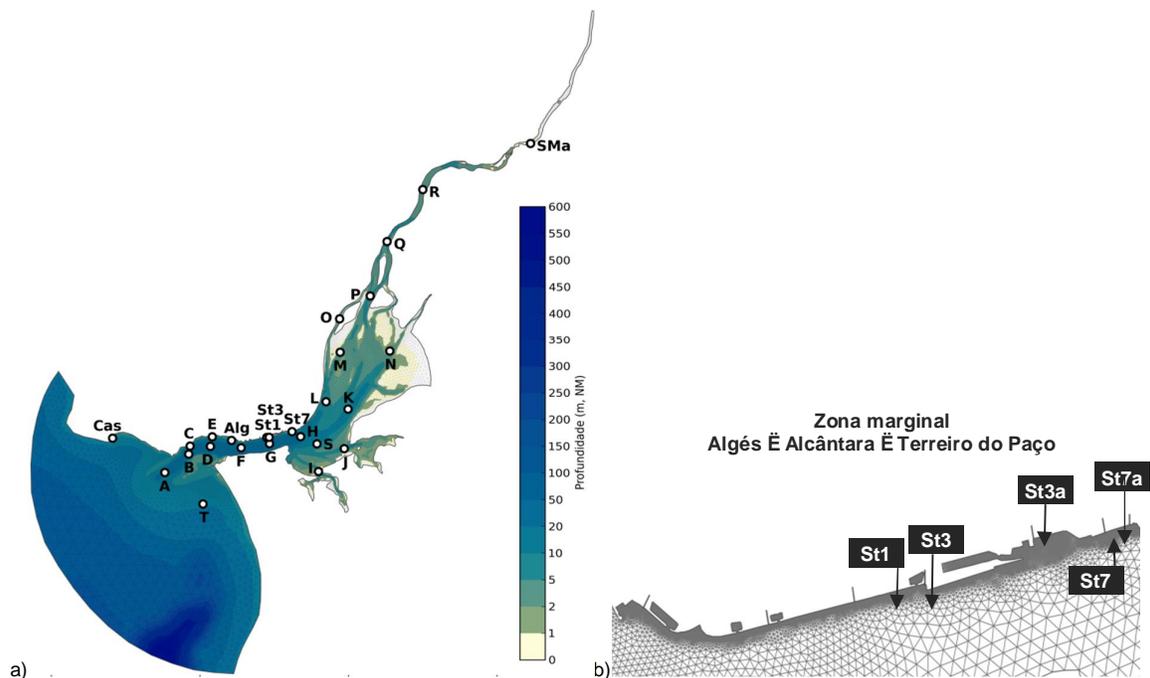


Figura 2. Modelo do estuário do Tejo: a) domínio de cálculo e batimetria e b) pormenor da malha de cálculo na zona marginal entre Algés e o Terreiro do Paço. A localização das estações de monitorização e das estações virtuais é indicada na figura.

Na versão atual do modelo do estuário do Tejo, o domínio horizontal é discretizado numa malha horizontal com cerca de 29000 nós e numa malha vertical híbrida com 20 níveis S e Z. Neste modelo são consideradas nove fronteiras abertas: o oceano Atlântico, o rio Tejo, o caneiro de Alcântara e outros seis descarregadores de tempestade do sistema de drenagem urbano (Fig. 2b). O modelo de drenagem urbana foi implementado em SWMM e inclui o desvio e a restituição para o caneiro de Alcântara do caudal tratado na ETAR. As concentrações dos indicadores microbiológicos foram estimadas com base em valores da literatura e medições locais, em tempo seco e de chuva, e considerando um modelo semi-empírico para a variação da qualidade da água (David et al., 2014).

A nova implementação do modelo foi validada por comparação com dados obtidos nas campanhas de 2011 do projeto PREPARED (David et al., 2015), utilizando uma abordagem similar a Rodrigues et al. (2013) e permitindo comparar os resultados obtidos em ambas as implementações. Os resultados evidenciam que o modelo representa adequadamente as principais variações observadas, observando-se para algumas variáveis, nomeadamente a salinidade, melhorias face à aplicação anterior (Fig. 3 e Fig. 4), provavelmente relacionadas com a atualização da batimetria nas zonas marginais.

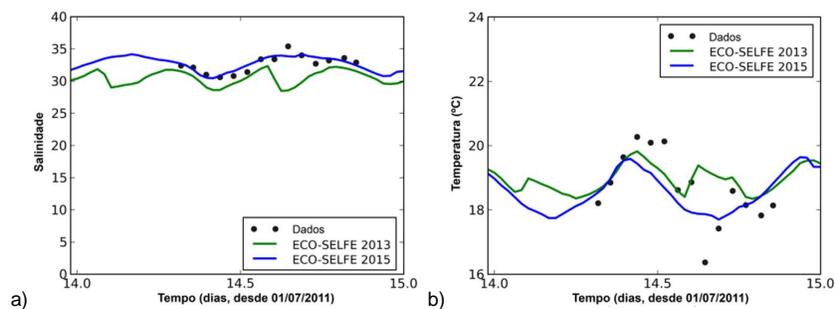


Figura 3. Comparação entre as observações e os resultados do modelo para a a) salinidade e b) temperatura para a aplicação com 1 descarga urbana (ECO-SELFE 2013, Rodrigues et al., 2013) e para a aplicação com 7 descargas urbanas (ECO-SELFE 2015).

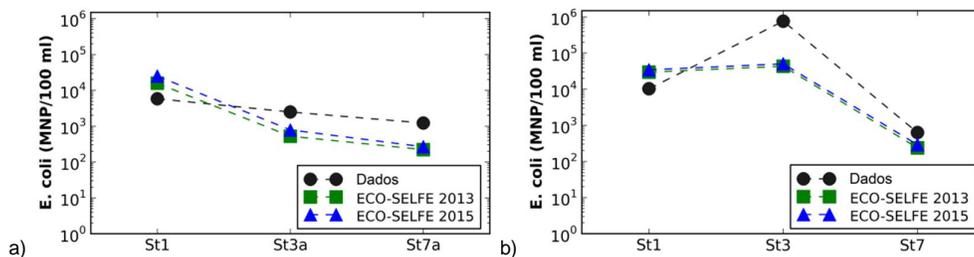


Figura 4. Comparação entre as observações e os resultados do modelo para as concentrações médias de *E. coli* em a) 15/julho/2011 e b) 6/setembro/2011 para a aplicação com 1 descarga urbana (ECO-SELFE 2013) e para a aplicação com 7 descargas urbanas (ECO-SELFE 2015).

A nova versão do modelo da circulação e da qualidade microbiológica da água do estuário do Tejo foi, assim, implementada em modo operacional na plataforma de previsão em tempo real, disponibilizando previsões diárias de elevações, velocidades, salinidade, temperatura, coliformes fecais e *E. coli* para um período de 48 horas (Fig. 5 e Fig. 6). Em modo operacional, o modelo é forçado por previsões de níveis, temperatura e salinidade do modelo IBI-MFC (<http://marine.copernicus.eu/>), extrapolações do caudal fluvial com base

nos dados disponíveis no SNIRH da estação de Almourol (<http://snirh.pt>) e previsões do modelo da rede de drenagem. O modelo do estuário do Tejo é também forçado por previsões atmosféricas de vento, temperatura do ar, pressão atmosférica e humidade relativa do modelo WRF 9km (disponíveis em <http://www.windguru.cz>), e de radiação solar e de radiação de longo comprimento de onda do modelo GFS 50km (disponíveis em <http://nomads.ncep.noaa.gov/model>). O modelo da rede de drenagem urbana é forçado por previsões de precipitação do modelo WRF 9km (disponíveis em <http://www.windguru.cz>) e por previsões da altura de água a jusante fornecidas pelo modelo do estuário. De forma a garantir a robustez do sistema de previsão, nomeadamente no caso da ocorrência de falhas no fornecimento dos forçamentos a WIFF integra esquemas de redundância. Estes esquemas de redundância incluem o uso de informação climatológica do caudal fluvial para forçar a fronteira fluvial e/ou o uso de resultados da análise harmónica de séries temporais de elevações em Cascais para forçar a fronteira oceânica.

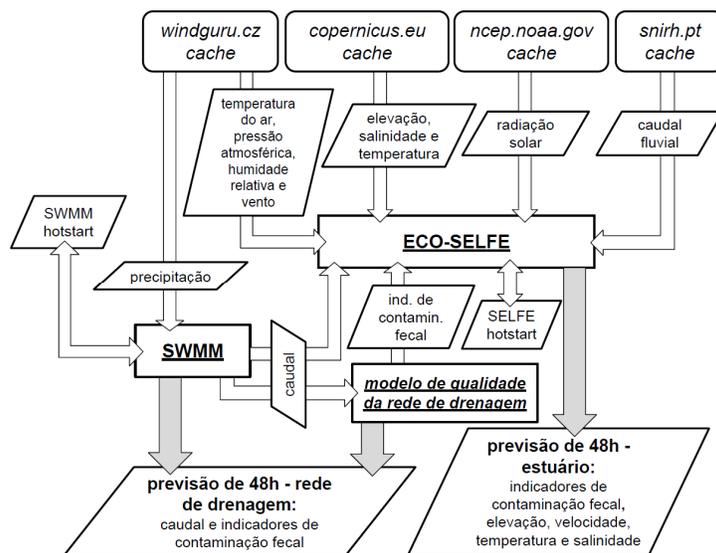


Figura 5. Workflow do sistema de previsão em tempo real da circulação e da qualidade da água do estuário do Tejo integrado na plataforma WIFF.

3.4 Rede de monitorização em tempo *quasi-real* e dados externos

O sistema de previsão e observação do estuário do Tejo integra, para além das previsões dos modelos numéricos, dados de observações disponíveis em tempo *quasi-real*, para aferição automática da qualidade das previsões. Em particular, foi instalada uma estação de monitorização da qualidade da água no estuário, na proximidade da descarga do caneiro de Alcântara. Esta estação de monitorização integrou um espectrofotómetro UV-Vis (Spectro::lyser S::CAN), uma sonda de amónia e pH (Ammo::lyser S::CAN), uma sonda de condutividade e temperatura (Condu::lyser S::CAN) e uma sonda de oxigénio dissolvido (Oxi::lyser S::CAN). Esta estação esteve operacional entre outubro de 2013 e agosto de 2014, encontrando-se a sua reposição em curso. Uma nova estação de monitorização na Marina do Parque das Nações está também em fase de implementação. A componente de observações integra, ainda, dados disponíveis publicamente, nomeadamente dados dos marégrafos de Cascais e de Algés. A comparação entre as previsões e as observações encontra-se disponível na interface de WebSIG (Fig. 6).

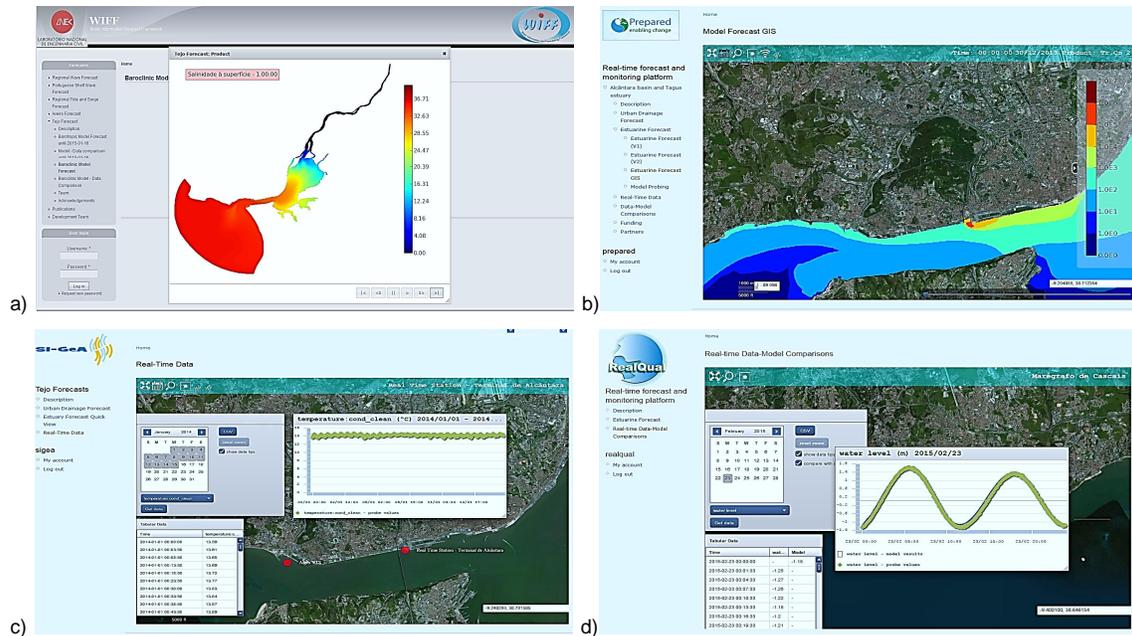


Figura 6. Exemplo das interfaces do WIFF do estuário do Tejo: a) previsão de salinidade, b) previsão de *E. coli*, c) dados disponíveis na estação de monitorização de Alcântara e d) comparação entre dados e previsões no marégrafo de Cascais.

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS FORÇAMENTOS DO SISTEMA DE PREVISÃO

4.1 Definição dos cenários

Para analisar a influência dos forçamentos nas previsões em tempo real da circulação e da qualidade da água no estuário do Tejo foram simulados diferentes cenários para os forçamentos oceânico, fluvial, atmosférico e das descargas de rede de drenagem urbana (Tabela 1). As previsões obtidas em cada um dos cenários foram comparadas com as previsões do modelo implementado em modo operacional. Em cada um destes cenários alterou-se apenas uma condição de forçamento, mantendo-se as restantes condições similares ao definido no cenário de base (Sim. 1). O cenário de base corresponde à previsão obtida com o modelo implementado em modo operacional e descrita na secção 3.3. A análise foi realizada para o ano hidrológico de 2013/2014.

Para avaliar a influência do forçamento implementado na fronteira oceânica consideraram-se três cenários: i) forçamento das elevações com o modelo regional de Fortunato et al. (2016) considerando 22 constituintes de maré (Sim. 2); ii) forçamento das elevações com a análise harmónica dos dados do marégrafo de Cascais considerando 29 constituintes de maré (Sim. 3); e iii) forçamento da temperatura com base em climatologia (valores médios mensais), estimada a partir da reanálise do modelo IBI-MFC (Sim. 4).

Para analisar a influência das descargas urbanas simularam-se três cenários: i) caudal da rede de drenagem proveniente apenas da descarga do caneiro de Alcântara (Sim. 7); ii) caudal da rede de drenagem estimado a partir dos dados de precipitação medidos na estação meteorológica de Lisboa (<http://www.wunderground.pt>, Sim. 8); e iii) forçamento dos coliformes fecais nas descargas urbanas com concentração constante, estimada a partir das campanhas de campo realizadas (David et al., 2015; Sim. 9).

13.º Congresso da Água

Tabela 1. Síntese dos cenários simulados.

Simulação	Forçamentos			
	Oceânico	Fluvial	Descargas urbanas	Atmosférico
1 (base)	<u>Elevação:</u> IBI MFC (marine.copernicus.eu) <u>Salinidade:</u> IBI MFC (marine.copernicus.eu) <u>Temperatura:</u> IBI MFC (marine.copernicus.eu) <u>E. coli, Coliformes fecais:</u> constante	<u>Caudal:</u> extrapolação . Almourol (snirh.pt) <u>Salinidade:</u> constante <u>Temperatura:</u> climatologia (snirh.pt) <u>E. coli, Coliformes fecais:</u> constante, climatologia (snirh.pt)	<u>Caudal:</u> 7 descargas (modelo da rede de drenagem, precipitação WRF 9km . windguru.cz) <u>Salinidade:</u> constante <u>Temperatura:</u> climatologia <u>E. coli:</u> constante <u>Coliformes fecais:</u> variável (modelo de qualidade da rede de drenagem)	<u>Vento, Temperatura do Ar, Humidade relativa, Pressão atmosférica:</u> WRF 9 km - Lisboa (windguru.cz) <u>Radiação solar, Radiação de longo comprimento de onda:</u> GFS 50 km (ncep.noaa.gov)
2	<u>Elevação:</u> modelo regional de Fortunato et al. (2016)			
3	<u>Elevação:</u> análise harmónica (marégrafo de Cascais)			
4	<u>Temperatura:</u> reanálise do modelo IBI-MFC (marine.copernicus.eu)			
5	<u>Caudal:</u> dados medidos . Almourol (snirh.pt)			
6	<u>Caudal:</u> climatologia . Almourol (snirh.pt)			
7	<u>Caudal:</u> 1 descarga (modelo da rede de drenagem, precipitação WRF 9km . windguru.cz)			
8	<u>Caudal:</u> 7 descargas (modelo da rede de drenagem, dados de precipitação da estação Lisboa - wunderground.com)			
9	<u>Coliformes fecais:</u> constante			
10	<u>Vento, Temperatura do Ar, Humidade relativa, Pressão atmosférica:</u> dados da estação Lisboa/Ajuda (wunderground.com)			
11	<u>Vento, Temperatura do Ar, Humidade relativa, Pressão atmosférica, Radiação solar, Radiação de longo comprimento de onda:</u> reanálise NCEP/NCAR (noaa.gov)			

A influência do forçamento atmosférico foi analisada considerando dois cenários: i) variáveis atmosféricas definidas com base nos dados medidos na estação meteorológica de Lisboa/Ajuda (<http://www.wunderground.pt>, Sim. 10); e variáveis atmosféricas definidas com base na reanálise do NCEP/NCAR (<http://www.ersl.noaa.gov>, Sim. 11).

4.2 Análise comparativa dos cenários

A comparação dos resultados das previsões dos vários cenários simulados com observações foi realizada num conjunto de estações onde existem dados disponíveis em tempo *quasi-real*, nomeadamente os marégrafos de Cascais e de Algés (período de outubro/2013 a setembro/2014) e a estação de monitorização instalada no cais de Alcântara (período de outubro/2013 a fevereiro/2014, secção 3.4), e com dados obtidos na campanha de campo realizada em janeiro/2014, num período de chuva, que incluiu a amostragem de variáveis físicas, químicas e microbiológicas nas estações indicadas na Fig. 2b.

Os resultados obtidos sugerem uma influência pouco significativa dos vários forçamentos nos erros médios das elevações (Tabela 2). As diferenças observadas entre cenários nos erros médios da salinidade e da temperatura são também reduzidas (Tabela 2), sendo as diferenças mais elevadas observadas na salinidade prevista com o caudal fluvial baseado em climatologia (Sim. 6) e na temperatura prevista com diferentes forçamentos atmosféricos (Sim. 10 e 11). Embora não existam diferenças significativas em termos de tendências médias entre os cenários, os resultados evidenciam diferenças significativas entre os vários cenários a escalas temporais curtas, particularmente relevantes na gestão operacional. No caso particular da salinidade, observa-se uma influência significativa do caudal fluvial nas previsões (Fig. 7). Em períodos de caudal elevado, o forçamento do modelo com valores médios mensais (climatologia, Sim. 6) conduz a uma sobrestimação muito significativa da salinidade no estuário (em Alcântara), com salinidades mínimas previstas da ordem de 16 face às observadas de 2 (Fig. 7, Tabela 2). A abordagem de base utilizada na previsão em modo operacional (Sim. 1) traduz-se numa boa aproximação nestes períodos (Fig. 7).

Tabela 2. Comparação das previsões com as observações: erros quadráticos médios (EQM) das elevações, da temperatura e da salinidade, e valores médios, mínimos e máximos (entre parênteses) da temperatura e da salinidade.

Simulação	Elevações		Temperatura (°C)		Salinidade	
	Cascais	Algés	Alcântara (St3)		Alcântara (St3)	
	EQM (m)	EQM (m)	EQM (°C)	Média (°C)	EQM (-)	Média (-)
1(base)	0.08	0.09	0.8	15.3 (10.9-20.1)	3.9	28.0 (2.5-35.3)
2	0.10	0.07	0.9	15.3 (10.8-20.0)	4.0	28.0 (2.5-35.4)
3	0.10	0.06	0.9	15.2 (10.7-20.1)	4.0	28.0 (2.6-35.5)
4	0.08	0.09	1.0	15.2 (10.8-19.8)	3.9	28.0 (2.5-35.7)
5	0.08	0.09	0.8	15.3 (10.9-20.1)	4.1	28.4 (2.0-35.4)
6	0.08	0.09	0.8	15.3 (10.7-20.1)	4.6	27.1 (16.3-33.5)
7	0.08	0.09	0.8	15.3 (10.8-20.2)	3.9	28.0 (2.5-35.3)
8	0.08	0.09	0.8	15.3 (10.9-20.2)	3.9	27.9 (2.5-35.3)
9	0.08	0.09	0.8	15.3 (10.8-20.2)	4.0	28.0 (2.5-35.3)
10	0.07	0.08	1.2	16.1 (11.8-20.7)	3.6	27.5 (6.1-33.6)
11	0.07	0.08	1.5	16.4 (13.3-20.7)	3.6	27.7 (4.5-33.3)
Dados	-	-	-	15.2 (11.7-21.4)	-	26.7 (2.1-33.9)

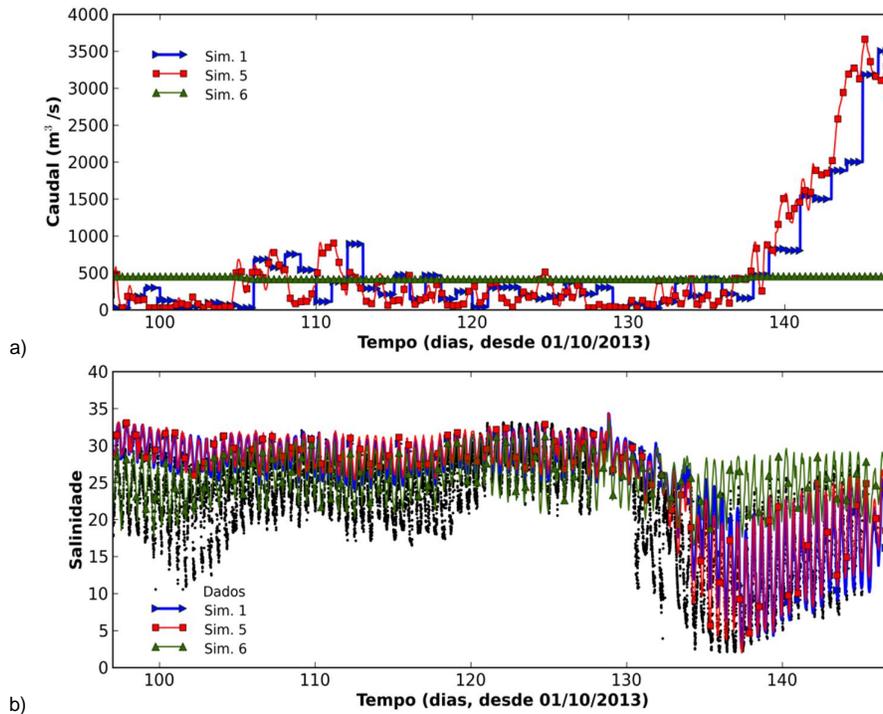


Figura 7. a) Caudais impostos na fronteira fluvial nos cenários 1 (Sim. 1 . base), 5 (Sim. 5 . dados de Almourol) e 6 (Sim. 6 . climatologia) e b) comparação entre as observações e as previsões de salinidade em Alcântara (estação St3) em cada um dos cenários.

No que se refere aos indicadores microbiológicos, os resultados observados sugerem que localmente a definição da concentração destes indicadores na fronteira das descargas da rede de drenagem urbana tem uma influência significativa nas previsões em períodos de caudais mais elevados (Fig. 8), característicos de períodos de chuva. Em períodos de tempo seco, é expectável que esta influência seja mais reduzida, devido ao menor caudal efluente.

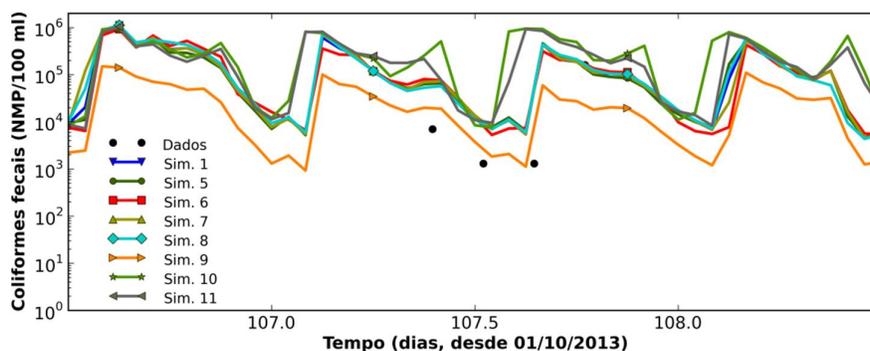


Figura 8. Comparação entre as observações e as previsões de coliformes fecais na estação St1 durante a campanha de 15/01/2014 (período de chuva).

A análise dos desvios máximos entre o cenário base e os restantes cenários sugere uma influência significativa do caudal fluvial nas previsões de salinidade e do forçamento atmosférico nas previsões de temperatura (Fig. 9). No que se refere às previsões de

salinidade, as diferenças são mais significativas na zona de transição do estuário, onde existe uma maior dinâmica caudal fluvial/maré (Fig. 9a). Nesta área, os desvios máximos podem ser da ordem de 4-7 em algumas estações (e.g. estações M, N e O), sendo muito significativos face à salinidade média nestas estações (cerca de 10-15). Para as previsões de temperatura, os desvios máximos são geralmente inferiores a 2°C (Fig. 9b). O desvio máximo observado ocorre próximo da fronteira fluvial, estando associado ao efeito combinado da incerteza na definição do caudal fluvial e da temperatura nesta fronteira (baseada em climatologia). Os desvios das previsões de temperatura são maiores na zona de transição do estuário, comparativamente à zona de jusante, dado que se trata de uma zona menos profunda, onde existe uma maior influência das trocas de calor com a atmosfera e, conseqüentemente, do forçamento atmosférico. Relativamente às previsões das concentrações dos indicadores microbiológicos, os resultados sugerem uma tendência semelhante para ambos os indicadores, exemplificada pelas previsões de *E. coli* (Fig. 9c). Os desvios nas previsões de *E. coli* tendem a ser mais elevados na zona de influência das descargas com concentrações deste indicador (fronteira fluvial e fronteira urbana Algés-Alcântara-Terreiro do Paço). Observa-se uma maior influência do caudal fluvial nas previsões de *E. coli* a montante e do forçamento atmosférico nas previsões a jusante, existindo localmente alguma influência das descargas da rede de drenagem urbana. Note-se que a importância relativa dos forçamentos nas previsões de *E. coli* poderia alterar-se caso fossem consideradas mais descargas no modelo, nomeadamente a jusante, dado que os resultados sugerem uma influência das descargas a nível local.

5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

No presente artigo analisou-se a influência dos forçamentos nas previsões da circulação e da qualidade da água do sistema de previsão WIFF do estuário do Tejo, recentemente atualizado. A quantificação e a redução da incerteza associada ao processo de modelação são fundamentais para melhorar a precisão das previsões. Estas questões são particularmente complexas na modelação operacional da qualidade da água, pela diversidade das componentes envolvidas, nomeadamente a abordagem de modelação em cascata. Os resultados obtidos neste estudo são um primeiro contributo nesse sentido, permitindo identificar e quantificar os forçamentos que influenciam mais significativamente as previsões e que, conseqüentemente, devem ser impostos com a maior precisão disponível.

Os resultados evidenciam que este sistema de previsão representa adequadamente os principais padrões de circulação no estuário do Tejo e, em particular, de qualidade da água na zona piloto do estudo, a bacia de Alcântara e zona marginal adjacente. A análise de sensibilidade realizada sugere uma influência significativa dos forçamentos a escalas temporais curtas, nomeadamente do caudal fluvial e do forçamento atmosférico nas previsões de salinidade e de temperatura, respetivamente. Estes forçamentos influenciam também significativamente a concentração dos indicadores microbiológicos, com uma maior influência do caudal fluvial a montante e do forçamento atmosférico a jusante, e uma influência local das descargas urbanas. A presente análise procurou identificar as principais tendências da influência dos forçamentos nas previsões, podendo em períodos específicos e, em particular, na proximidade das descargas da rede de drenagem urbana a importância relativa dos forçamentos nas previsões de qualidade da água variar. Esta análise poderá, assim, ser alargada e aplicada a períodos temporais mais curtos (e.g. escalas sazonais, eventos de elevada precipitação) em estudos futuros.

13.º Congresso da Água

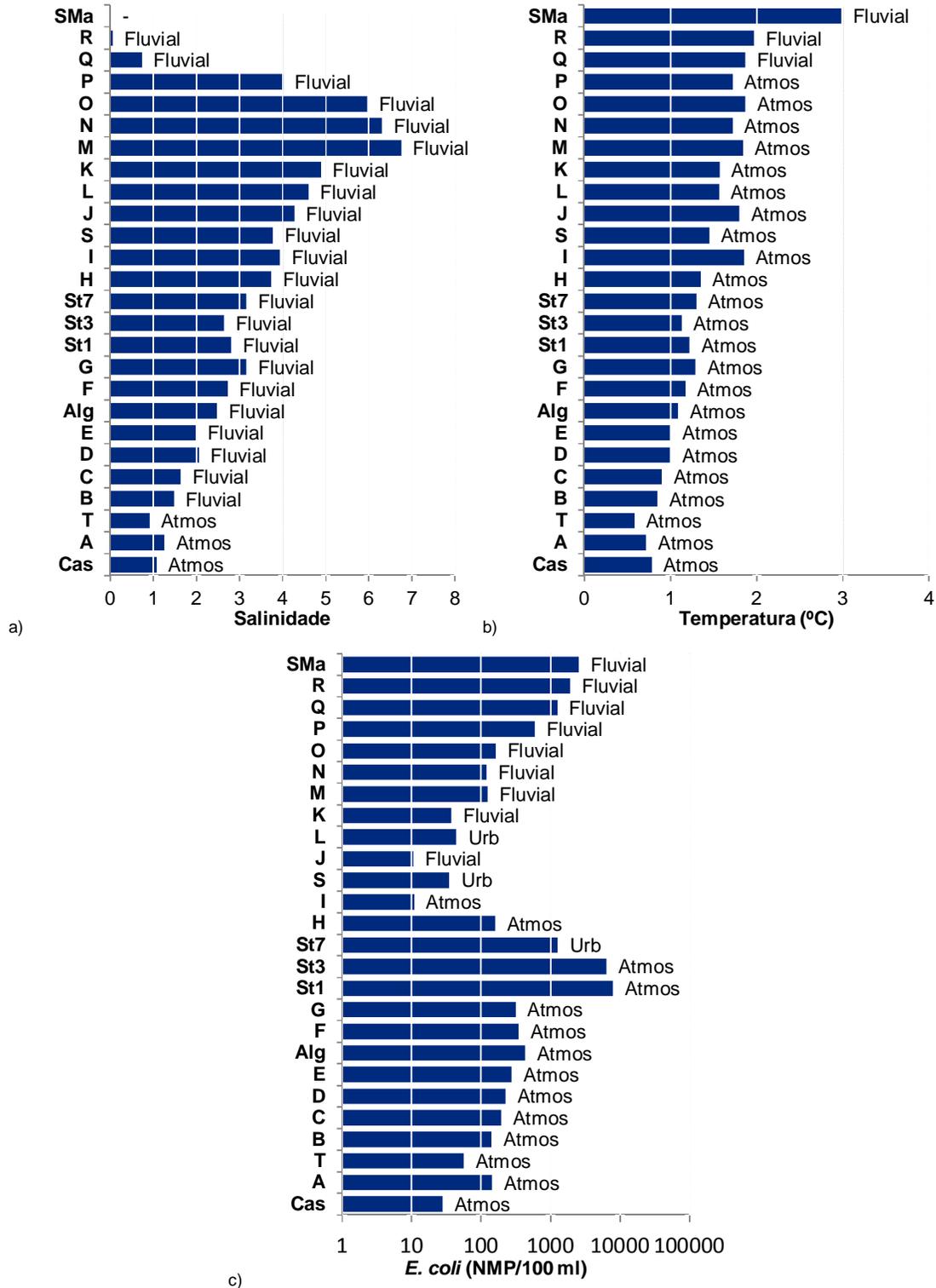


Figura 9. Desvios máximos nas previsões de salinidade (a), temperatura (b) e de *E. coli* (c) no estuário do Tejo nas estações virtuais, distribuídas de montante (StMa . Salvaterra de Magos) para jusante (StCas . Cascais) e identificação do forçamento associado (Fluvial . caudal fluvial, Atmos . forçamento atmosférico, Urb . descargas urbanas)

13.º Congresso da Água

A melhoria futura do sistema de previsão da circulação e da qualidade da água do estuário do Tejo deve estar associada à melhoria dos forçamentos hidrológico e atmosférico. Os desenvolvimentos futuros devem também considerar estratégias adicionais de quantificação e redução da incerteza. Embora as estratégias de simulações múltiplas (*ensembles*) e de assimilação de dados sejam amplamente utilizadas na quantificação e redução da incerteza em previsões meteorológicas e oceanográficas (e.g. Höllt et al., 2015), e com alguma frequência nas previsões hidrológicas (e.g. McMillan et al., 2013), só recentemente é que estes métodos começaram a ser explorados para a previsão em tempo real da qualidade da água (Chan et al., 2013; Kim et al., 2014), tendo sido identificadas melhorias significativas na precisão das previsões. No entanto, existem ainda várias limitações para a utilização destes métodos em modo operacional, associadas à escassez de dados em tempo real e à disponibilidade de processamento computacional necessária para o fornecimento de previsões em tempo útil, pelo que a sua utilização nos sistemas atuais de previsão da qualidade da água é ainda rara. Os avanços significativos na disponibilização dos recursos computacionais, em particular, dos recursos de computação elevado desempenho (Rogero et al. 2015), constituem uma oportunidade neste sentido.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora foi co-financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da bolsa de pós-doutoramento SFRH/BPD/87512/2012. Este estudo foi co-financiado pelos projetos PREPARED (Sétimo Programa Quadro), SI-GeA (QREN/FEDER/POR Lisboa) e RealQual (Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento). Os autores agradecem aos Prof. António Melo Baptista (OHSU) e Prof. Joseph Zhang (VIMS) por disponibilizarem livremente o código do modelo SELFE. Os autores agradecem também a todos os participantes na campanha de campo de janeiro de 2014 do LNEC, das Águas de Lisboa e Vale do Tejo e do Instituto Superior Técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bedri Z., Corkery A., O'Sullivan J.J., Alvarez M.X., Erichsen A.C., Deering L.A., Demeter K., O'Hare G.M.P., Meijer W.G., Masterson B. (2014). An integrated catchment-coastal modelling system for real-time water quality forecasts. *Environ. Modelling&Soft.* 61, 458. 476.
- Chan S.N., Thoe W., Lee J.H.W. (2013). Real-time forecasting of Hong Kong beach water quality by 3D deterministic model. *Water Research* 47, 1631. 1647.
- David L.M., Oliveira A., Rodrigues M., Fortunato A.B., Rogeiro J., Jesus G., Mota T., Costa J., Gomes J., Menaia J., Póvoa P., David C., Ferreira F., Matos J.S., Matos R.S. (2014). Real-time monitoring and forecasting system for early warning of recreational waters contamination. In *Proceedings of the 13th IWA/IAHR ICUD 2014* (Sarawak), 9 pp.
- David L.M., Rodrigues M., Fortunato A.B., Oliveira A., Mota T., Costa J., Rogeiro J., Jesus G., Gomes J.L., Menaia J., David C., Póvoa P., Frazão A., Matos R. (2015). Demonstration system for early warning of faecal contamination in recreational waters in Lisbon. In *Climate Change, Water Supply and Sanitation: Risk Assessment, Management, Mitigation and Reduction*. Ed. Hulsmann A. et al. IWA Publishing. London.
- Fortunato A.B., Costa R.T., Rogeiro J., Gomes J.L., Oliveira A., Li K., Freire, P., Rilo A., Mendes A., Rodrigues M. (2015). Desenvolvimento de um sistema operacional de previsão de temporais na Costa Portuguesa. In *Atas do VIII PGZCPEP*. Aveiro, 15 pp.

13.º Congresso da Água

- Fortunato AB, Li K, Bertin X., Rodrigues M., Martinez B. (2016). Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast. *Ocean Engineering* 111, 471-482.
- Fortunato, A.B., Oliveira, A., Baptista, A.M. (1999). On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanologic Acta* 22/1, 31-44.
- 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.
- Höllt T., Altaf M.U., Mandli K.T., Hadwiger M., Dawson C.N., Hoteit I. (2015). Visualizing uncertainties in a storm surge ensemble data assimilation and forecasting system. *Natural Hazards* 77(1), 317-336.
- Jesus, G., Gomes, J., Ribeiro, N.A., Oliveira, A., (2012). Custom deployment of a Nowcast-forecast information system in coastal regions. In *Proceedings of Geomundus 2012*. Lisboa.
- Kim S., Seo D.-J., Riazi H., Shin C. (2014). Improving water quality forecasting via data assimilation . Application of maximum likelihood ensemble filter to HSPF. *Journal of Hydrology* 19(Part D), 2797. 2809.
- McMillan H.K., Hreinsson E.Ö., Clark M.P., Singh S.K., Zammit C., Uddstrom M.J. (2013). Operational hydrological data assimilation with the recursive ensemble Kalman filter. *Hydrology and Earth Systems Science* 17, 21. 38.
- Neves, F.S. (2010). Dynamics and hydrology of the Tagus estuary: results from in situ observations. *Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa*. Lisboa, 210pp.
- Nogueira Mendes, R., Ceia, R., Silva, T., Rilo, A., Guerreiro, M., Catalão, J., Taborda, R., Freitas, M. C., Andrade, A., Melo, R., Fortunato, A.B., Freire, P. (2012). Remote sensing and intertidal cartography. MorFeed project. In *Atas das 2^{as} JEH*. Lisboa, 341-344.
- Oliveira A., Jesus G., Gomes J.L., Rogeiro J., Azevedo A., Rodrigues M., Fortunato A.B., Dias J.M., Tomas L.M., Vaz L., Oliveira E.R., Alves F.L., Den Boer S. (2014). An interactive WebGIS observatory platform for enhanced support of integrated coastal management. *Journal of Coastal Research Special Issue* 70, 507-512.
- Rilo, A., Freire, P., Ceia, R., Mendes, R.N., Catalão, J., Taborda, R. (2012). Human effects on estuarine shoreline decadal evolution. In *Geophysical Research Abstracts*, 14. Viena.
- 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. In *Proceedings of the 6th SCACR*. Lisboa, 10 pp.
- 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.
- Rogeiro J., Azevedo A., Rodrigues M., Oliveira A. (2015). Running high resolution coastal forecasts: moving from grid to cloud resources. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Ed. J. Kruis, Y. Tsompanakis, B.H.V. Topping, Civil-Comp Press. Stirlingshire, Paper 218.
- Thoe W., Wong S.H.C., Choi K.W., Lee J.H.W. (2012). Daily prediction of marine beach water quality in Hong Kong. *Journal of Hydro-environment Research* 6 (3) 164. 180.