

# Recursos Hídricos

Volume 41, N.º 2 | dezembro 2020

VOLUME ESPECIAL 1/2

15º CONGRESSO DA ÁGUA



**ASSOCIAÇÃO  
PORTUGUESA DOS  
RECURSOS HÍDRICOS**

**Título**

Revista Recursos Hídricos

**Data de publicação**

20 de fevereiro de 2021

**Data do número**

Dezembro 2020

**Proprietário**

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

**Diretor**

António Gonçalves Henriques

**Subdirectora**

Maria Manuela Portela

**Diretores Associados**

Fernanda Santiago

Paulo Rosa Santos

**Conselho Editorial**

António Betâmio de Almeida

António Guerreiro de Brito

António Pinheiro

António Trigo Teixeira

Catarina Roseta Palma

Fernando Veloso Gomes

Francisco Ferreira

Francisco Nunes Correia

Jaime Melo Baptista

João Pedroso de Lima

Jorge Matos

José Matos

Luís Ribeiro

Manuel Rijo

Manuela Moreira da Silva

Maria da Conceição Cunha

Paulo Canelas de Castro

Rafaela Matos

Rodrigo Maia

Rodrigo Oliveira

Susana Neto

Teresa Ferreira

**Membros da Comissão Diretiva**

Susana Neto (Presidente)

Manuela Moreira da Silva (Vice-Presidente)

Pedro Teiga (Vice-Presidente)

Amparo Sereno (Vogal)

Luís David (Vogal)

**Secretariado**

Ana Estêvão

André Cardoso

Conceição Martins

**Redação, Administração e Sede do editor**

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

a/c LNEC

Av. do Brasil, 101

1700-066 Lisboa

PORTUGAL

Telefone 21 844 34 28 Fax 21 844 30 17

NIF n.º 501063706

**Design**

Ana Rosária Gonçalves

**Periodicidade**

Semestral

**Edição digital gratuita****Estatuto Editorial**

<http://www.aprh.pt/rh/estatuto-editorial.html>

Os artigos publicados na Recursos Hídricos são identificados com DOI (Digital Object Identifier).

Registo de Pessoa Colectiva n.º 501063706

Registo na ERC n.º 125584

ISSN 0870-1741

## Apoiantes



Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural

# ÍNDICE

EDITORIAL .....	5
CT&I (CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO) .....	7
<i>Gestão operacional de infraestruturas hidráulicas. Aplicação a casos práticos</i>	
Jorge CARDOSO-GONÇALVES, José TENTÚGAL-VALENTE .....	9
<i>Protótipo do To-Sealert para o Porto da Ericeira</i>	
Ana Catarina ZÓZIMO, Conceição J. E. M. FORTES, Liliana V. PINHEIRO, Nathan SMITHERS, Vera SERRAZINA, Maria Teresa REIS .....	21
<i>Water Sensitive Urban Design: Gestão do Ciclo Urbano da Água para uma Cidade de Quarteira Sensível à Água</i>	
Miguel RODRIGUES, Carla ANTUNES .....	37
<i>Análise de eventos de risco através de modelação numérica XBeach. Caso de Estudo – Costa da Caparica</i>	
Andreia Marques FERREIRA, Conceição J.E.M. FORTES, Maria Teresa REIS, Juan L. GARZON .....	51
<i>Avaliação do Estado Trófico e Proveniência do Fósforo nos Paus da Praia da Vitória, ilha Terceira, Açores</i>	
César PIMENTEL, Francisco RODRIGUES, João MADRUGA, Rui ELIAS .....	65
<i>A modelação da qualidade da água como suporte ao ordenamento da albufeira de Castelo do Bode</i>	
Pedro SANTOS COELHO, Manuel ALMEIDA, Ricardo REBELO, Maria Felisbina QUADRADO, Francisco RIBEIRO TELES, João PÁDUA .....	75



## EDITORIAL NÚMERO ESPECIAL RH

Este Número especial da Revista Recursos Hídricos é dedicado ao 15º Congresso da Água da APRH que se realiza de 22 a 26 de março deste ano (2021), sob o tema **“Para uma política da água em Portugal - o contributo da APRH”**.

Neste importante evento, iremos em 2021 dar a conhecer os principais resultados do nosso trabalho nos últimos três anos, nomeadamente os resultados do esforço de articulação entre as atividades das Comissões Especializadas e dos Núcleos Regionais, promovendo sinergias e o fomento interno de uma cultura colaborativa. O Congresso irá assim destacar através das sessões temáticas o trabalho desenvolvido em torno de áreas disciplinares específicas e será promovida igualmente uma reflexão transversal sobre temas atuais como a política da água em Portugal que é o grande lema deste evento

Num contexto pleno de desafios agravados pelos efeitos devastadores da pandemia causada pelo vírus SARS COV 2 nas suas múltiplas variantes, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estão longe de ser cumpridos de forma equitativa a nível global e o desigual acesso à água mantém um papel de charneira. Em Portugal, as políticas ambientais carecem também de reforço através da resolução dos problemas de governança da água. Necessitamos de contribuir e criar, de forma colaborativa, uma espinha dorsal para a política da água que seja sustentada numa visão de longo prazo. Esse é um dos principais objetivos deste 15º Congresso da Água.

As políticas públicas para a boa gestão e governança da água devem ser estrategicamente pensadas

e articuladas a par das outras políticas públicas do ordenamento e planeamento territorial, da saúde, da agricultura, da energia, do turismo e da conservação da natureza. Mas nessa articulação não deve perder-se a especificidade da água e a sua importância crítica para a salvaguarda futura e usos sustentáveis de um bem que é indispensável e insubstituível. O Congresso da Água 2021, organizado em torno deste tema fundamental, procura assim contribuir positivamente para uma melhor definição pelo Governo da política da água em Portugal, num processo inclusivo e visando soluções de governança que garantam uma partilha equitativa dos benefícios decorrentes deste bem comum.

Em colaboração com a Comissão Organizadora do Congresso, apresentam-se seis artigos selecionados submetidos ao Congresso e à Recursos Hídricos e que abrem este Número Especial do Congresso da Água - Volume 1. Ainda durante o Congresso, ou imediatamente a seguir, serão editados novos Volumes deste Número Especial. Fazemos votos de que a sua disseminação através da Recursos Hídricos contribua para o aprofundamento de conhecimentos que é necessário à formulação dessas políticas públicas.

Com as melhores saudações associativas.

### Susana Neto

**Presidente da Comissão Diretiva e Presidente da Comissão Organizadora do 15º Congresso da Água**

### António Gonçalves Henriques

**Diretor da Revista Recursos Hídricos**





**ct&i**

(Ciência, Tecnologia e Inovação)



# Gestão operacional de infraestruturas hidráulicas. Aplicação a casos práticos

## *Operational management of hydraulic infrastructures. Application to practical cases*

Jorge CARDOSO-GONÇALVES<sup>1</sup>, José TENTÚGAL-VALENTE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Civil, FEUP, Associado APRH nº 1802, [jjtc.goncalves@gmail.com](mailto:jjtc.goncalves@gmail.com)

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado, FEUP, Associado APRH nº 567, [tentugalvalente@gmail.com](mailto:tentugalvalente@gmail.com)

**RESUMO:** A gestão eficaz e eficiente das infraestruturas hidráulicas que suportam os sistemas de abastecimento de água, os sistemas de drenagem de águas residuais e os sistemas de drenagem de águas pluviais, relaciona-se com os procedimentos existentes nos diversos níveis organizacionais das entidades gestoras. O envolvimento transversal da estrutura e o compromisso dos colaboradores consideram-se elementos cruciais para a implementação de uma estratégia operacional integrada, que procure continuamente soluções economicamente viáveis, ambientalmente sustentáveis e socialmente interessantes. Tendo em conta diversos contributos científicos relacionados com a gestão de infraestruturas e atendendo à importância da sistematização de dados reais, realça-se a pertinência da estruturação de uma metodologia de Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas (GOIH) que vise a obtenção de resultados expeditos, que auxiliem a exploração dos sistemas e apoiem a decisão.

Neste artigo aborda-se a metodologia de GOIH desenvolvida no âmbito da tese de doutoramento intitulada “Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas” (Autor: Jorge Cardoso-Gonçalves; Orientador: José Tentúgal-Valente), que agrega conceitos de gestão patrimonial de infraestruturas hidráulicas (GPI), de gestão do risco (GR) e de gestão técnica (GT).

Apresentam-se resultados da aplicação prática desta estratégia operacional ao Sistema de Abastecimento de Água de Arouca (SAA-Arouca), onde se operacionalizaram as medidas propostas em Cardoso-Gonçalves (2019), avaliando globalmente os ganhos de eficiência obtidos no período seguinte.

Palavras-Chave: gestão operacional, abastecimento de água, infraestruturas hidráulicas, perdas de água.

**ABSTRACT:** The effective and efficient management of the hydraulic infrastructures that support the water supply systems, the wastewater drainage systems and the rainwater drainage systems, are related to the procedures existing at the different organizational levels of the managing entities. The transversal involvement of the structure and the commitment of the employees are considered crucial elements for the implementation of an integrated operational strategy, that continuously seeks economically viable, environmentally sustainable and socially interesting solutions. Taking into account several scientific contributions related to the management of infrastructures and given the importance of the systematizing of real data, we realized the relevance of the structuring of a methodology for Operational Management of Hydraulic Infrastructures (GOIH) aimed at obtaining expeditious results, which help the systems exploration and support the decision.

This article deals with the GOIH methodology developed in the doctoral thesis entitled “Operational Management of Hydraulic Infrastructures” (Author: Jorge Cardoso-Gonçalves<sup>1</sup>; Advisor: José Tentúgal-Valente<sup>2</sup>), which aggregates concepts of asset management (GPI), risk management (GR) and technical management (GT).

We present results of the practical application of this operational strategy to Arouca Water Supply System (SAA-Arouca), where the measures proposed in Cardoso Gonçalves (2019) were operationalized, globally evaluating the efficiency gains achieved in the following period.

Keywords: operational management, water supply, hydraulic infrastructure, water loss.

## 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, o aumento de urbanização em polos concentrados e a desertificação das áreas rurais, o incremento do nível serviço e de requisito, o término da fase de construção de novos sistemas numa parte significativa dos locais, a exploração de sistemas em envelhecimento, a garantia de níveis de desempenho com eficiência crescente, os cenários de escassez de recursos, a forte disponibilidade de dados e de meios tecnológicos de apoio à gestão, e a necessidade de preservação do *know-how* existente e de capacitação de novos recursos humanos são trechos da realidade que se verifica no contexto atual de gestão das infraestruturas hidráulicas. Por um lado, o referido demonstra o balanço globalmente positivo das últimas décadas (e.g.: cobertura dos sistemas de abastecimento de água; segurança da água; despoluição dos meios recetores; cobertura dos sistemas de drenagem de águas residuais; garantia da qualidade em origens e meios recetores; adequada gestão de águas urbanas), por outro, evidencia a necessidade de refletir sobre as fragilidades e as oportunidades atuais (Cardoso-Gonçalves, 2019).

O objetivo central deste artigo prende-se com a apresentação da metodologia de GOIH desenvolvida em Cardoso-Gonçalves (2019) e a síntese dos resultados da sua aplicação a um caso de estudo, dando cumprimento aos seguintes objetivos específicos: enquadramento da temática da GOIH; apresentação da metodologia proposta; abordagem ao caso de estudo SAA-Arouca e à estratégia operacional implementada; sistematização de resultados práticos da implementação da metodologia; análise da evolução global do sistema; discussão e proposta de evoluções futuras.

Este artigo organiza-se em: considerações iniciais; gestão operacional de infraestruturas hidráulicas (abordagem geral e metodologia proposta); aplicação a um caso de estudo (SAA-Arouca; estratégia operacional; resultados práticos; evolução global); considerações finais (conclusões; evoluções futuras); referências bibliográficas.

## 2. GESTÃO OPERACIONAL DE INFRAESTRUTURAS HIDRÁULICAS

### 2.1. Abordagem Geral

A gestão do recurso água deverá ser resiliente na resposta aos desafios que surgem na exploração dos sistemas de abastecimento de água, dos sistemas de drenagem de águas residuais e dos

sistemas de drenagem de águas pluviais. A GOIH, por intermédio da gestão otimizada destes sistemas que garantem a prestação de um serviço essencial, deverá responder às necessidades da sociedade através de soluções economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, considerando os seguintes desígnios (Cardoso-Gonçalves e Tentúgal-Valente, 2018c): preservação das origens; disponibilidade em cenários de escassez; segurança no abastecimento; salvaguarda de meios recetores; resposta a fenómenos extremos; adaptação a novos contextos.

A metodologia de GOIH proposta desenvolve-se na sequência de uma revisão bibliográfica diversificada e assenta em três pilares fundamentais: gestão patrimonial de infraestruturas (GPI), gestão do risco (GR) e gestão técnica (GT). Nos parágrafos seguintes, referem-se brevemente alguns dos aspetos do estado arte efetuado na referida investigação.

Alegre *et al.* (2012) refere que os serviços públicos de água representam um exemplo paradigmático, realçando que representam serviços públicos essenciais, embora, vulgarmente, a sociedade os considere como óbvios e pouco valorizados. As infraestruturas que os suportam são de visibilidade reduzida e apresentam elevado custo de construção e durabilidade. A GPI estrutura práticas de gestão tradicionais, que integra em princípios de gestão por objetivos e de melhoria contínua, privilegiando novas técnicas de análise, de comparação e de comunicação.

A GPI pode definir-se como a arte de equilibrar o desempenho, o custo e o risco, baseando-se em competências de gestão, engenharia e informação, planeadas ao nível estratégico, tático e operacional. Refere-se que a definição de prioridades e a seleção de necessidades de intervenção carecem do conhecimento dos ativos (infraestruturas) e que o diagnóstico da situação existente permite que se avalie a vida residual e o valor económico das infraestruturas (Alegre, 2008).

Num processo de decisão, o risco aborda-se como a impossibilidade de antecipar a estrutura, os resultados e as consequências, incluindo a incerteza e os resultados da mesma (Herz e Thomas, 1983). A inclusão do risco no processo de decisão necessita que se considerem dois fatores, nomeadamente a probabilidade de ocorrência de cenários e as consequências prováveis dos cenários. A decisão que tenha em conta e insira estes fatores no processo de decisão refere-se como decisão informada pelo risco (Almeida, 2011).

Em relação a aplicações técnicas da análise quantitativa do risco, indica-se como consolidada a definição técnica geral do risco, que parte da

hipotética ocorrência (no futuro e em determinado sistema) de um acontecimento, com consequências negativas ou positivas. O risco determina-se pelo produto entre probabilidades e consequências (Almeida, 2011). Sugere-se que se utilize a definição técnica geral de risco por ser uma metodologia de cálculo expedita, que se pode sustentar em dados reais e que possibilita a utilização do risco do ponto de vista operacional, de forma adaptativa e versátil, informando a tomada de decisão

Organizacionalmente, Almeida (2017) refere que a maioria das EG não apresenta documentos organizacionais (e.g.: planos de segurança da água – PSA; planos de redução de perdas; planos de gestão de contadores) e salienta que os peritos identificam estes documentos como um dos principais detalhes das “causas organizativas”, referidas como a segunda principal causa para as perdas de água, logo após as “causas infraestruturais”. Propõe-se que a metodologia de GOIH integre a gestão técnica como um dos seus principais pilares, incluindo nesta, questões operacionais (e.g.: controlo operacional; perdas de água; aflúências indevidas; operação de infraestruturas; modelação; sistemas de informação geográfica) e questões organizacionais (gestão da mudança).

A metodologia de GOIH proposta desenvolve-se como um elemento agregador dos conceitos de GPI, de GR e de GT, propondo um novo modelo de organização que se apresenta com maior detalhe em 2.2.

## 2.2. Metodologia Proposta

A metodologia proposta em Cardoso-Gonçalves (2019) integra um conjunto de etapas principais, que se entendem importantes para a otimização operacional das infraestruturas hidráulicas. Ainda assim, salienta-se a necessidade de considerar

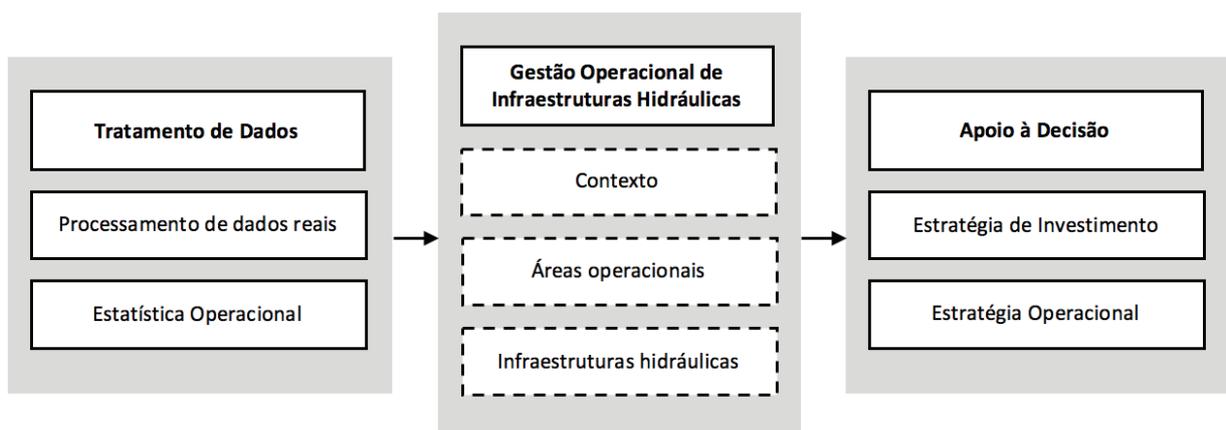
a flexibilidade e a adaptabilidade das etapas propostas, permitindo a aplicação da metodologia de GOIH a sistemas em diferentes níveis de atuação (alta e baixa), de complexidade, de desenvolvimento, de informação e de acordo com estruturas organizacionais distintas.

Na Figura 1 apresentam-se as principais etapas da estratégia operacional, nomeadamente o tratamento de dados (etapa prévia que inclui o processamento de dados e a estatística), a GOIH (especificada na figura 2) e o apoio à decisão.

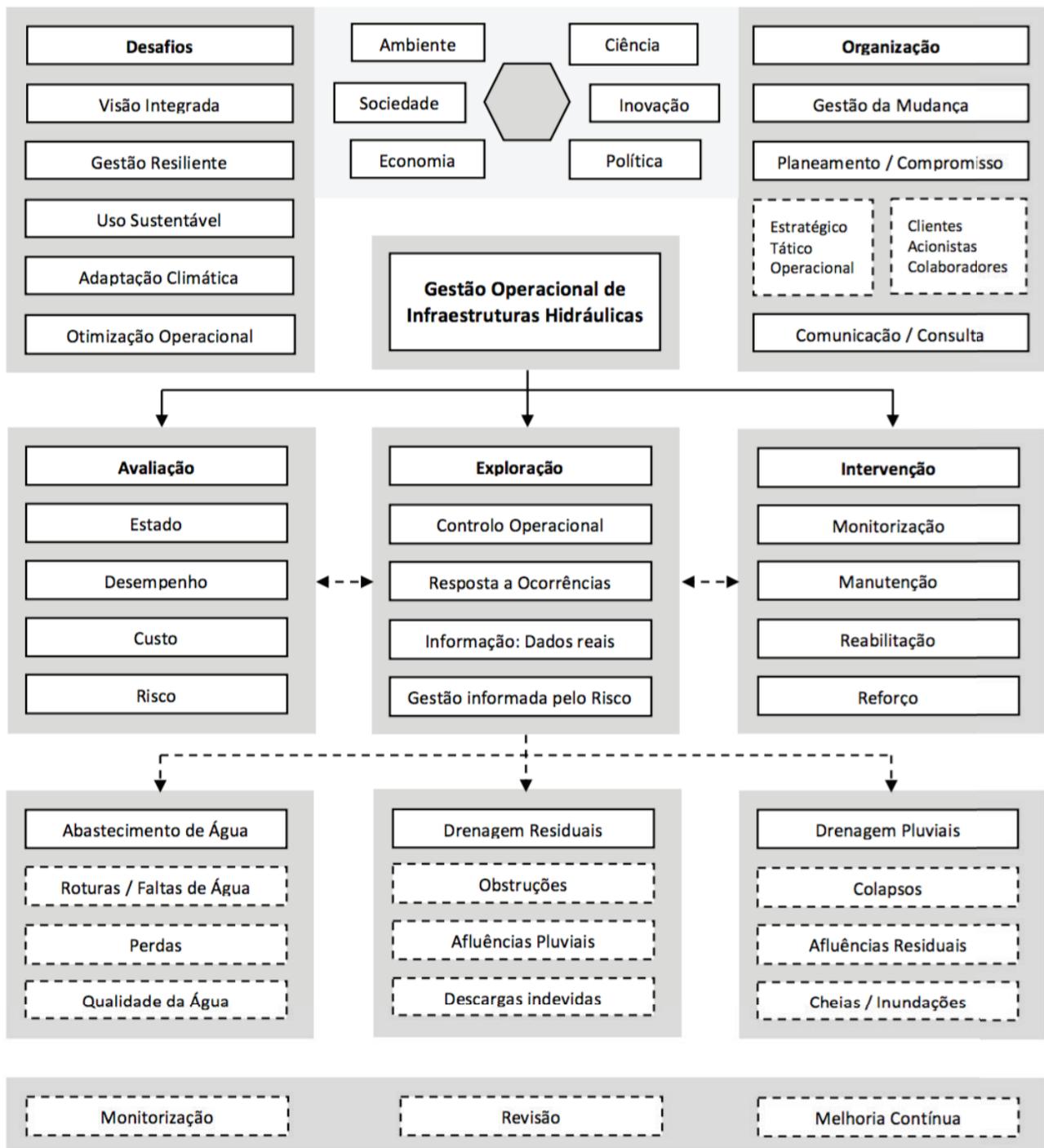
Após o prévio tratamento dos dados disponíveis, a metodologia de GOIH (Figura 2), que deverá atender a um equilíbrio *macro* (ambiente, sociedade, economia, ciência, inovação e política), inicia-se pelo estabelecimento do contexto (desafios e organização) e divide-se em três áreas operacionais (subdivididas em unidades operacionais), designadamente: avaliação (estado, desempenho, custo e risco); exploração (controlo operacional, resposta a ocorrências, dados reais e gestão informada pelo risco); intervenção (monitorização, manutenção, reabilitação e reforço). De forma mais específica, a metodologia versa sobre diversos problemas operacionais (e.g., resposta a ocorrências; perdas de água; aflúências pluviais às redes de drenagem de águas residuais; inundações – soluções de controlo na origem).

A operacionalização da metodologia proposta inclui as seguintes três etapas, aplicáveis durante todo o processo: monitorização da metodologia; revisão da metodologia; melhoria contínua.

Tendo como ponto de partida os dados reais de exploração e a informação cadastral disponível, aplica-se a metodologia de GOIH (Figura 2) a casos práticos (e.g., sistemas de abastecimento de água, sistemas drenagem de águas residuais), propondo otimizações operacionais que visem o incremento



**Figura 1.** Representação esquemática das etapas da estratégia operacional (Cardoso-Gonçalves, 2019).



**Figura 2.** Representação Esquemática da Metodologia de GOIH (Cardoso-Gonçalves, 2019).

da qualidade do serviço, a diminuição dos encargos de exploração e a salvaguarda do ambiente. A abordagem proposta relaciona-se com a definição de uma estratégia operacional que inclui a discussão dos critérios de conceção dos sistemas e a proposta, a operacionalização e o teste de ações operacionais (avaliação, exploração, intervenção). Os resultados que se apresentam podem enquadrar-se em duas fases distintas da aplicação da metodologia, designadamente: ações propostas em resultado da análise do sistema com base na metodologia

(*e.g.*, ações de combate às perdas de água; ações de controlo de afluências indevidas); resultados obtidos após a implementação das ações propostas pela metodologia (*e.g.*, evolução de água não faturada; evolução de volumes entregues em alta). A gestão dos serviços de águas não obedece a um grupo de procedimentos preconcebidos, realçando-se o dinamismo constante e a importância do contexto. A GOIH dever-se-á adaptar à realidade das infraestruturas e dos intervenientes (*e.g.*: entidades gestoras, entidades

reguladoras, clientes). A metodologia proposta procura organizar procedimentos operacionais, tendo em vista o aumento da eficácia na resposta e a procura de eficiência na mobilização de recursos, sintetizando os resultados de ações efetuadas e sistematizando as ações a propor. O recurso água necessita de ser gerido de forma resiliente e devem procurar-se soluções robustas para responder aos desafios que surgem na exploração dos sistemas de abastecimento de água, dos sistemas de drenagem de águas residuais e dos sistemas de drenagem de águas pluviais.

### 3. APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO

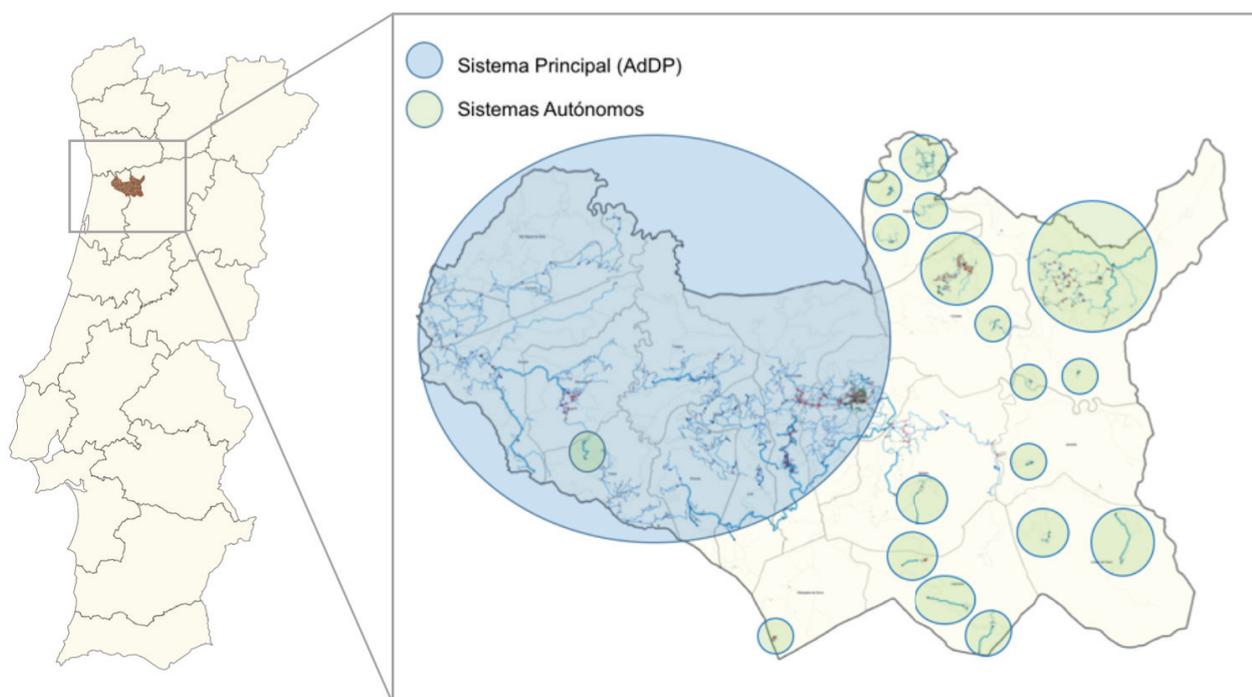
#### 3.1. Sistema de Abastecimento de Água de Arouca

O SAA-Arouca (figura 3) abastece o concelho de Arouca (distrito de Aveiro), com uma área aproximada de 327 km<sup>2</sup> e uma população de cerca de 24 000 habitantes. A área abastecida trata-se de uma zona rural, localizada no interior de Portugal, com uma orografia caracterizada por fortes variações em altitude. Este sistema divide-se no Sistema Principal (SP), abastecido “em alta” através 6 Pontos de Entrega (PE) pela Águas do Douro e Paiva, S.A., e nos Sistemas Autónomos (SA), abastecidos por captações descentralizadas (furos e minas). As informações da entidade gestora (EG) referentes ao ano de 2017 referem que este sistema se subdivide

em 25 subsistemas, que integram 6 PE “em alta” (Abelheira; Provisende; Souto Redondo; Ameixieira; Forcada; Moldes), 27 captações de água, 20 estações elevatórias, 17 sistemas de tratamento, 43 reservatórios e cerca de 200 VRRP, e apresentam uma extensão total (adutoras e distribuidoras) superior a 400 km. A EG é a Águas do Norte, S.A.

#### 3.2. Estratégia Operacional

A estratégia de GOIH proposta foca-se particularmente na organização, mobilizando os recursos existentes e otimizando os procedimentos em curso, propondo outros que visem o incremento da eficácia da resposta e da eficiência de exploração. A metodologia de GOIH implementada no SAA-Arouca desenhou-se, desenvolveu-se e aplicou-se de forma integrada com a exploração deste sistema de abastecimento de água, realçando-se a flexibilidade da metodologia e a contribuição colaborativa e de aprendizagem mútua entre academia e empresa. Este caso de estudo surge em diferentes fases da investigação, designadamente no estabelecimento do contexto, no enquadramento organizacional, na avaliação das infraestruturas, na discussão e na otimização dos procedimentos operacionais, bem como na sistematização das diversas intervenções executadas e a executar. Produziram-se diversos elementos que foram integrados no âmbito da gestão operacional deste sistema.



**Figura 3.** Representação do SAA-Arouca (adaptado de Cardoso-Gonçalves e Tentúgal-Valente, 2018a).

De acordo com a estrutura apresentada na Figura 2, aplicam-se as três áreas operacionais (avaliação, exploração e intervenção) ao SAA-Arouca, obtendo-se resultados que orientaram as ações operacionais levadas a cabo neste sistema, e cujos resultados práticos se apresentam no ponto seguinte.

Em relação à avaliação das infraestruturas do SAA-Arouca em termos de condição, desempenho, custo e risco, refere-se que esta incluiu captações, condutas adutoras, reservatórios, sistemas de tratamento, condutas distribuidoras, válvulas reductoras de pressão (VRP) e estações elevatórias. A avaliação efetuada possibilitou que se identificassem as principais fragilidades e pontos fortes do sistema, informação que contribuiu para que melhor se orientassem as ações operacionais, designadamente através da gestão do risco associado a diferentes infraestruturas. A avaliação de custos efetuada (através de inquéritos à EG e da informação que consta em Covas *et al.*, 2018), apontou para um custo de substituição de cerca de 19,8 M€, com um valor atual na ordem dos 12,2 M€, e com um IVI de cerca de 0,62, que poderá indicar que as infraestruturas que encontram consolidadas, investindo-se, em média, o equivalente à depreciação.

No que se refere a ações propostas para a área operacional de avaliação, salienta-se a atualização da avaliação infraestrutural efetuada (estado; desempenho; custo; risco) num momento posterior, após os resultados das ações de otimização operacional e das intervenções (manutenção; monitorização; reabilitação; reforço) efetuadas no SAA-Arouca. Propõe-se, também, o levantamento e a avaliação de outras infraestruturas (*e.g.*, válvulas de seccionamento; ventosas; descargas de fundo; hidrantes; ramais domiciliários; ramais de incêndio) e de equipamentos eletromecânicos, a avaliação mais detalhada das captações, a elaboração de planos de GPI e a elaboração de previsões de custos reabilitação.

Na área operacional de exploração, cuja abordagem foi significativamente articulada com a equipa de exploração do SAA-Arouca, de acordo com a metodologia de GOIH proposta, foram propostas diversas ações para cada uma das unidades operacionais (controlo operacional; resposta a ocorrências; informação – dados reais; gestão informada pelo risco), bem como especificamente no caso do combate às perdas de água. Salienta-se que grande parte das ações desenhadas em consonância com o diagnóstico efetuado até ao final do ano de 2017 estão executadas ou encontram-se em execução.

Na unidade de controlo operacional, salienta-se a proposta e a implementação de equipas funcionais (prevenção; monitorização do SAA – qualidade da água; roturas e desobstruções; VRP; Perdas e Infiltrações), que possibilitou a otimização dos recursos humanos, a introdução de um planeamento estruturado de equipas, a monitorização sistemática de Consumos Mínimos Noturnos (CMN) e a gestão de materiais e equipamentos de apoio à exploração. A maior agilidade na resposta a ocorrências promoveu alterações organizacionais, tanto nos meios internos como na mobilização de prestadores externos, que reforçou de forma significativa a eficácia operacional, traduzindo-se numa diminuição dos tempos de resposta.

A utilização de dados reais na GOIH, no contexto atual (desenvolvimento tecnológico e forte disponibilidade de dados reais gerados automaticamente), considerou-se prioritária como elemento de apoio à exploração das infraestruturas e à tomada de decisão. Efetuou-se um tratamento sistemático de dados reais, que se utilizaram na interpretação e na proposta de melhorias operacionais, sugerindo-se que se registem históricos de dados cada vez mais robustos, com particular foco na obtenção de informação útil.

No âmbito da aplicação desta metodologia de GOIH, a gestão informada pelo risco surge como uma estratégia de apoio à exploração que procura aproximar a tomada de decisão da objetividade e das ações preventivas, distanciando-a da subjetividade e das ações reativas. As estratégias operacionais concebidas e implementadas e os investimentos (intervenções de monitorização, manutenção, reabilitação e reforço) propostos e efetuados no decorrer dos anos 2017 e 2018, no SAA-Arouca, tiveram em conta a análise de risco efetuada, de acordo com a perspetiva de “gestão informada pelo risco”. O risco associado aos subsistemas de Abelheira, de Souto Redondo e, em particular, de Moldes, nas componentes de risco de rotura, risco de falta de água e risco de perdas de água, determinou o planeamento de ações, os investimentos efetuados e o posicionamento das equipas.

O combate às perdas de água desenhado para o SAA-Arouca constituiu uma das peças fulcrais da investigação, que pretendeu, mais do que ser uma estratégia de combate às perdas de água, representar uma forma de ver a GOIH, defendendo que a otimização dos procedimentos operacionais, a organização das equipas e dos meios, e uma boa gestão das infraestruturas hidráulicas constitui um caminho global que possibilita que se incremente a eficiência hídrica (perdas de água), energética,

económica (redução de perdas económicas associadas a ineficiências) e operacional (capacidade de resposta), tornando os sistemas mais robustos e mais resilientes.

Na EG que opera o SAA-Arouca, as perdas aparentes encontram-se, organizacionalmente, numa área distinta da exploração, com a qual se desenvolveu o presente trabalho. Ainda assim, realça-se a importância do combate a esta componente das perdas de água, nomeadamente através da redução de perdas por erros de medição (aferição e substituição de contadores), da redução de perdas por consumos não faturados (instalação de contadores) e da redução de perdas por consumos não autorizados (ações de inspeção).

Relativamente às perdas reais de água no SAA-Arouca, a estratégia estruturada, desenhada e implementada no âmbito da aplicação da metodologia de GOIH desenvolvida e tendo em conta a bibliografia de base, assentou nas seguintes componentes principais:

- Eliminação do extravasamento em reservatórios de distribuição;
- Gestão de pressões na rede de distribuição;
- Diminuição do tempo de resposta na reparação de roturas;
- Controlo ativo de perdas (constituição de equipa funcional de perdas);
- Substituição de condutas.

A estrutura metodológica de GOIH possibilitou, numa perspetiva de apoio à decisão, priorizar, planear e estruturar as medidas anteriores, de acordo com o retorno operacional das diferentes ações suprarreferidas, tanto na sua distribuição espacial como temporal.

A área operacional de intervenção em infraestruturas hidráulicas inclui quatro unidades operacionais, designadamente a monitorização, a manutenção, a reabilitação e o reforço. No decorrer da investigação foram propostas um conjunto de intervenções, tendo sido parte delas já executadas. No que respeita à monitorização encontram-se em curso, no SAA-Arouca, um conjunto de rotinas (monitorização de reservatórios; monitorização de VRP; monitorização de fontanários e origens não controladas; monitorização e registo sistemático de ocorrências). Em termos de manutenção, salienta-se que se efetuaram algumas intervenções em reservatórios e importantes ações de manutenção ao parque de VRP.

As intervenções efetuadas nas VRP do SAA-Arouca apresentam particular relevância, pelo efeito que a gestão de pressões poderá ter na otimização dos sistemas de abastecimento de água, particularmente

nos sistemas que se encontram instalados em locais com a orografia do concelho de Arouca (acentuadas variações em altitude). Em consonância com a estratégia desenhada no trabalho de investigação efetuado, até ao final do ano de 2018, instalaram-se 61 novas VRP, substituíram-se 26, efetuou-se manutenção a 92 VRP e reduziu-se a pressão em 101 VRP. A redução média de pressão a jusante de VRP, da 1ª fase de gestão de pressões, foi de cerca de 30%. Em 2019, dando continuidade à metodologia de GOIH desenvolvida, instalaram-se mais 26 VRP, substituíram-se mais 25 VRP, efetuou-se manutenção a cerca de 20 VRP e diminuiu-se a pressão em 87 VRP (redução média de 10 mca por VRP). A 2ª fase de gestão de pressões, que ficou concluída no final do ano de 2019, possibilitou uma redução média de pressão a jusante de VRP de, aproximadamente, 20%. Sintetizam-se todos os trabalhos em VRP no SAA-Arouca:

- Instalação de 87 novas VRP;
- Substituição de 51 VRP;
- Manutenção de 112 VRP;
- Redução de Pressão em 188 VRP;
- Redução média de pressão: 50%.

As intervenções de reabilitação e reforço de condutas e VRP, desde 2016 até ao final do ano de 2018, representaram um investimento global de cerca de 850 000€, correspondente ao reforço de cerca de 10 km de condutas, à reabilitação de 12 km de condutas, à instalação de 61 VRP e à substituição de 26 VRP. O investimento operacional (ações de monitorização e manutenção de infraestruturas; custos com recursos humanos, com viaturas e com materiais), desde 2016 até ao final de 2018, correspondeu a cerca de 400 000 €.

No decorrer do ano de 2019, de acordo com a estratégia preconizada, manteve-se o investimento operacional e, em termos infraestruturais, reabilitaram-se aproximadamente 5 km de condutas, reforçaram-se cerca de 2,7 km de condutas, instalaram-se 26 VRP e substituíram-se 25 VRP, efetuando-se um investimento global de cerca de 0,55 M€, correspondente às seguintes componentes:

- Investimento operacional: cerca de 200 000 €;
- Investimento em reabilitação e reforço de condutas: 249 759 €;
- Investimento em reabilitação e reforço de VRP: 103 300 €.

Na Tabela 1 sintetizam-se os investimentos infraestruturais efetuados no SAA-Arouca, no período 2016-2019.

**Tabela 1.** Síntese de custos de intervenções efetuadas no SAA-Arouca (quadriénio 2016-2019).

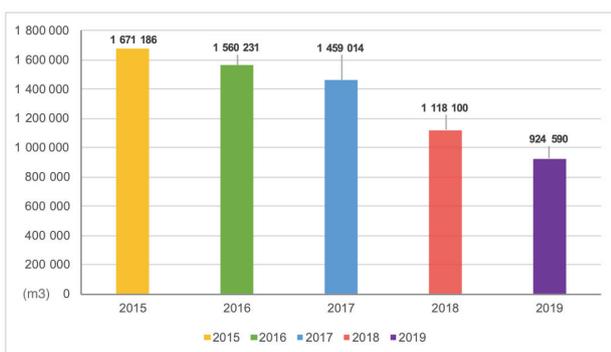
Ano	Reabilitação		Reforço		Total
	Condutas	VRP	Condutas	VRP	
2016	83 235 €	-	-	-	83 235 €
2017	202 425 €	21 000 €	172 764 €	81 000 €	477 189 €
2018	101 663 €	25 250 €	109 597 €	57 500 €	294 010 €
2019	180 453 €	*44 300 €	69 306 €	*59 000 €	353 059 €
<b>total</b>	<b>567 776 €</b>	<b>90 550 €</b>	<b>351 667 €</b>	<b>197 500 €</b>	<b>1 207 493 €</b>

\*valores estimados com base nos dados reais de instalação até 2018

### 3.3. Resultados Práticos

Tendo sido dada continuidade à aplicação da metodologia de GOIH, apresentam-se, neste artigo, os resultados completos até ao final do ano de 2019, bem como uma previsão dos próximos anos, de acordo com o estado atual de desempenho das infraestruturas do SAA-Arouca, particularmente em relação às perdas de água e às ocorrências. A análise efetuada neste artigo centra-se no SP do SAA-Arouca.

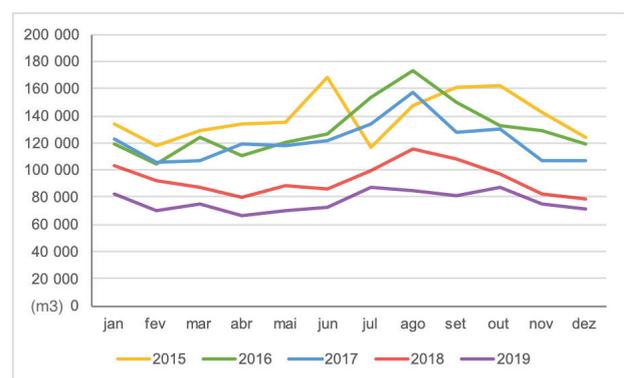
Para a avaliação das perdas de água, opta-se pela análise da evolução da Água Entrada no Sistema (AES), nos 6 PE do SP do SAA-Arouca. Em 2019, relativamente a 2015, a água fornecida “em alta” reduziu-se para cerca de metade (redução de 45%), representado uma redução global, no quadriénio 2016-2019, de cerca de 1,6 milhões de m<sup>3</sup> (110 995 m<sup>3</sup> em 2016; 212 172 m<sup>3</sup> em 2017; 553 086 m<sup>3</sup> em 2018; 746 596 m<sup>3</sup> em 2019). A redução de água adquirida pela Águas do Norte, S.A. traduz-se numa diminuição de custos de, aproximadamente, 845 000 € (0,5207 €/m<sup>3</sup>). A Figura 4 representa graficamente a evolução anual de AES no SP do SAA-Arouca.



**Figura 4.** Evolução Anual de AES no SP do SAA-Arouca (quinquénio 2015-2019)

Cardoso-Gonçalves e Tentúgal-Valente (2018a) indicam que, desde 2015, se desativaram 5 origens autónomas do SAA-Arouca, sendo as respetivas zonas de abastecimento de água integradas no SP, privilegiando a garantia de continuidade do serviço e de qualidade de água distribuída. Por isso, salienta-se que a redução de AES que se verificou incorpore, mesmo assim, o aumento da área abastecida e do número de clientes do SP.

A Figura 5 representa graficamente a evolução do volume mensal global de AES nos 6 PE do SP do SAA-Arouca. Verifica-se que, sensivelmente a meio do ano de 2017, ocorreu uma redução da AES, tendo-se acentuado essa tendência a partir dessa altura.



**Figura 5.** Evolução Mensal da Água Entrada no Sistema Principal do SAA-Arouca (quinquénio 2015-2019)

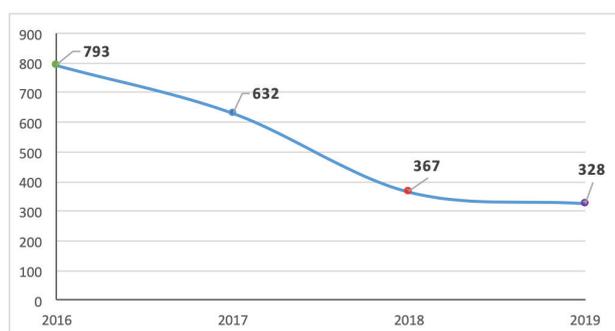
No que se refere ao combate às perdas de água, a Figura 6 representa a evolução do volume mensal global (nos 6 PE do SP do SAA-Arouca) de AES, encontrando-se assinaladas as principais ações propostas e implementadas no SAA-Arouca.



**Figura 6.** Evolução Mensal Água Entrada no Sistema Principal do SAA-Arouca (quinquénio 2015-2019)

A estratégia de GOIH aplicada ao SAA-Arouca incorporou as medidas de combate às perdas de água (controlo de extravasamento; gestão sistemática de ocorrências; gestão de pressões; reabilitação e reforço de infraestruturas; controlo ativo de perdas), orientando-se a sua operacionalização (espacial e temporal) pela avaliação das infraestruturas e pela análise de dados reais efetuadas.

Outra das componentes do desempenho do SAA-Arouca que se avalia no presente artigo, na sequência da metodologia de GOIH testada neste sistema, refere-se à evolução do número de roturas ocorridas no SP do SAA-Arouca (Figura 7). Ao longo dos últimos 4 anos, relativamente ao ano de 2016, ocorreram menos 1 052 roturas no SP do SAA-Arouca, uma redução de cerca de 40%, com uma diminuição de custos de, aproximadamente, 420 800 € (400 €/rotura).



**Figura 7.** Evolução da ocorrência de roturas no Sistema Principal do SAA-Arouca (quadriénio 2016-2019)

A EG do SAA-Arouca investiu, até ao final do ano de 2019, cerca de 1 821 093 € (1 207 493 € de investimento infraestrutural e 613 600 € de investimento operacional) e os ganhos obtidos (redução de perdas de água e de roturas), no mesmo período, estimam-se em 1 265 797 €. Com base nestes valores, refere-se que os investimentos

associados à estratégia de gestão operacional adotada apresentam um período de retorno inferior a 2 anos.

### 3.4. Evolução Global

Numa abordagem global, nos parágrafos seguintes, analisa-se a evolução do SAA-Arouca com a aplicação da estratégia operacional, considerando os ganhos para a EG “em baixa” (Águas do Norte, S.A.), para o fornecimento “em alta” (energia elétrica) e na componente ambiental. A eficiência hídrica pode analisar-se de acordo com uma perspetiva de “nexus água-energia” e de “nexus água-ambiente”.

No que diz respeito aos consumos energéticos, Miranda *et al.* (2018) refere que a água fornecida “em alta” ao SAA-Arouca incorpora um custo energético de 4 kWh/m<sup>3</sup>, correspondente a 0,44 €/m<sup>3</sup>. No que se refere às emissões de CO<sub>2</sub>, face à energia consumida, a conversão proposta, no mesmo trabalho, é de cerca 188 gCO<sub>2</sub>/kWh.

Tendo como ano de referência 2015, a Tabela 2 sistematiza os ganhos de eficiência (redução de perdas de água; redução de consumo de energia elétrica; redução de roturas; redução de emissões de CO<sub>2</sub>) associados ao SP do SAA-Arouca, até ao final do ano de 2019.

**Tabela 2.** Síntese de ganhos de eficiência no SAA-Arouca (quadriénio 2016-2019).

Redução de perdas de água (0,5207 €/m <sup>3</sup> )	1 622 809 m <sup>3</sup> (844 997 €)
Redução de consumo de energia elétrica (4 kWh/m <sup>3</sup> ; 0,44€/m <sup>3</sup> )	6 491 236 kWh (714 036 €)
Redução de roturas (400 €/rotura)	1052 un (420 800 €)
Redução de emissões de CO <sub>2</sub> (188 gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	305 ton de CO <sub>2</sub>

A análise da redução global de custos no abastecimento de água ao Município de Arouca deverá incorporar, também, a redução dos custos energéticos associados, que, no caso deste sistema, apresentam valores consideravelmente elevados. Tendo em conta os valores propostos anteriormente, estima-se que, face a 2015, se tenha reduzido cerca de 0,71 M€ em custos energéticos, correspondentes a mais de 6 milhões de kWh. Globalmente, a otimização operacional que se implementou neste sistema traduziu-se numa redução de custos, entre 2016 e 2019, de cerca de 2 M€.

Na componente ambiental, salienta-se que o incremento de eficiência no SAA-Arouca,

particularmente na redução de perdas de água, apresenta um contributo que se poderá estimar, através da redução de consumos energéticos, numa redução de cerca de 305 ton de emissões de CO<sub>2</sub>, comparativamente com o ano de 2015.

Considerando os consumos médios diários que se verificam em fevereiro de 2020, estima-se uma redução do consumo médio diário associado aos 6 PE da Águas do Douro e Paiva, S.A. de, aproximadamente, de 440 m<sup>3</sup>. Embora seja expectável que esta redução se acentue, pela continuidade da estratégia de combate às perdas de água, caso se mantenha nestes valores pode alcançar-se, no final do ano de 2020, uma redução de AES, face a 2019, entre 14% e 17%, consoante o perfil de consumos que se possa verificar. Neste cenário, no final do ano de 2020, é expectável que a AES se encontre, aproximadamente, entre os 765 000 m<sup>3</sup> e os 795 000 m<sup>3</sup>, o que, a manter-se o nível de AF, corresponderá a um nível de perdas reais próximo de 30%.

Realça-se que a transformação referida nos parágrafos anteriores se verificou em apenas três anos (2017, 2018 e 2019), através de um modelo que assentou, sobretudo, na organização dos meios disponíveis, direcionando os recursos para as atividades que se identificaram como prioritárias para o incremento de eficiência do sistema. Parte-se de um patamar de perdas reais próximo de 80% em 2015 e, em fevereiro de 2020, alcança-se um patamar de perdas reais de cerca de 30%. Tendo em conta os ganhos energéticos associados ao fornecimento “em alta” ao SAA-Arouca (0,71 M€), o tempo de retorno do investimento global (“em alta” e “em baixa”) poderá ser de cerca de 1 ano.

Com os valores referentes a fevereiro de 2020, considerando que se mantém este patamar, perspectiva-se que, face a 2015, a redução anual de custos seja de cerca de 1 M€ (0,46 M€ em perdas de água; 0,19 M€ em roturas; 0,39 M€ em energia). De acordo com o exposto, perspectiva-se que nos próximos de 30 anos, face a 2015, a redução global de custos sistematizada anteriormente seja superior a 30 M€, situação que contribuirá para a sustentabilidade económico-financeira do SAA-Arouca.

No âmbito da gestão dos restantes três sistemas de abastecimento de água “em baixa” geridos pela Parceria da Águas do Norte, S.A. (Amarante, Baião e Cinfães), após se começarem a demonstrar os resultados obtidos no SAA-Arouca (Cardoso-Gonçalves e Tentúgal-Valente, 2017, 2018a, 2018b), adotaram-se, nestes municípios, no decorrer do ano de 2018, medidas de combate às perdas de água semelhantes às propostas em Cardoso-Gonçalves

(2019), que já tinham sido implementadas no SAA-Arouca em 2017. Globalmente, a Parceria da Águas do Norte, S.A. adquiriu “em alta”, no ano de 2019, menos cerca de 24% de água (1 394 665 m<sup>3</sup>), face a 2017.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1. Conclusões

A exploração otimizada e sustentável dos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais assume um papel preponderante na qualidade de vida das pessoas e na salvaguarda dos seus bens. A crescente urbanização e as solicitações com um grau de exigência cada vez mais elevado alavancam a otimização das respostas dos sistemas de abastecimento de água, considerando temáticas como a análise de consumos, a garantia de qualidade da água, a gestão de perdas, a adequabilidade de tarifas e a continuidade do serviço. A gestão das infraestruturas hidráulicas que alicerçam os sistemas de abastecimento de água deve pautar-se pela eficácia e eficiência, suportando-se num conhecimento aprofundado dos sistemas e das suas solicitações.

A abordagem à GOIH deverá efetuar-se segundo metodologias flexíveis, adaptativas, de aplicação cíclica e com o foco na melhoria contínua. Acredita-se que a utilização de ferramentas expeditas, em detrimento de modelos mais complexos, e o teste em lugar dos modelos previsionais sofisticados, poderão conduzir a resultados interessantes, envolvendo toda a estrutura das EG, sobretudo em estrita colaboração com as equipas de exploração. A metodologia de GOIH preconizada deverá ser suficientemente versátil para ser aplicada a sistemas “em alta” e a sistemas “em baixa”, de diferentes dimensões e em distintos estádios de elaboração. A estruturação da metodologia referenciada procurou que a ausência de dados, a limitação temporal das investigações e a aplicação específica a casos de estudo não limitasse a abrangência da metodologia, que inclui diversas componentes que não se aplicam.

A fase de tratamento de dados constitui a componente prévia da metodologia de GOIH e assume particular pertinência no contexto atual, em que se verifica uma geração rápida e, muitas vezes, automática ou sistemática, de dados de vária ordem (e.g.: registos de exploração; levantamentos de infraestruturas; relatórios de empreitadas), que necessitam de ser processados e tratados estatisticamente de forma a serem transformados em informação útil.

Abordando, em especial, o caso de estudo do SAA-Arouca, podem tecer-se algumas considerações de caráter mais genérico. As infraestruturas deste sistema apresentam um estado, em média, razoável, um desempenho eficaz e um nível de risco intermédio. Na área operacional de exploração, nesse estudo abordam-se os procedimentos anteriores, propõe-se outros, elaboram-se ferramentas de apoio à exploração, e estabelece-se uma estratégia operacional que considere o combate às perdas de água como uma prioridade. Neste âmbito, destaca-se o desenho e operacionalização de equipas funcionais (equipa de resposta a ocorrências; equipa de VRP; equipa de perdas), com a gestão de pressões efetuada na rede de distribuição e com as restantes ações de combate às perdas concretizadas. Em relação à intervenção em infraestruturas hidráulicas, realça-se a organização de intervenções executadas desde o ano de 2016 (parte delas equacionadas no âmbito desta investigação) e de outras a executar no futuro (planeadas anteriormente pela EG e preconizadas no campo da metodologia de GOIH). Refere-se que, após a implementação da metodologia em estudo, se passou de um nível de perdas reais próximo de 80% para cerca de 30% em apenas 3 anos, reduzindo-se a água fornecida “em alta” para cerca de metade, com investimentos com retorno inferior a 2 anos.

Os sistemas de pequena dimensão são sistemas com poucos clientes que, naturalmente, são propícios a níveis de perdas mais elevados. Embora nos últimos anos tenha sido feito um esforço para a gestão conjunta de sistemas de pequena dimensão, através de diferentes metodologias de agregação, que melhorou o panorama geral e demonstrou resultados positivos, atualmente ainda existem múltiplos sistemas de pequena dimensão, com elevados níveis de ineficiência. Particularmente nestes casos, uma metodologia de GOIH estruturada possibilitará que se introduzam práticas simples, de baixo investimento e com o envolvimento de meios internos que já operam nesses sistemas, que poderão conduzir a ganhos consideráveis, com um período de retorno relativamente baixo.

#### 4.2. Evoluções Futuras

A modelação dos sistemas de abastecimento de água, de drenagem de águas residuais e de drenagem de águas pluviais, a monitorização permanente de diferentes parâmetros (e.g.: qualidade da água, caudais, volumes, pressões, ocorrências), bem como o teste e implementação de modelos de *forecasting*, referem-se como possibilidades a ponderar, de acordo com o estágio

de desenvolvimento e a disponibilidade financeira das EG. O contexto de elevados níveis de ineficiências, em determinadas entidades gestoras, poderá ditar que se adotem metodologias mais expeditas, com resultados rápidos e com menor mobilização de meios internos (e.g., RH) e de recursos financeiros. Os ganhos obtidos, geralmente rápidos, poderão financiar as soluções mais sofisticadas, que podem ser introduzidas de forma faseada e em períodos de teste.

Em sistemas com elevados níveis de perdas de água e com patamares de pressão consideravelmente elevados, onde a implementação de outras soluções se possa verificar difícil, por limitações de diferentes tipos (e.g.: económico-financeiras; disponibilidade de meios; tempo), poderá ser equacionada a redução de pressões em período noturno, através da instalação de VRP com modelação que permita patamares diferentes, em período noturno e diurno. Contudo, este tipo de soluções deverá ser estudado criteriosamente, considerando a necessidade de abastecimento a pontos críticos (e.g., hospitais; marcos de incêndio). As soluções com modelação com *loggers* de pressão que salvaguardem o abastecimento a esses pontos críticos poderão ser uma alternativa. Em sistemas com níveis de perdas particularmente reduzidos, este tipo de soluções, sobretudo de caráter transitório, pode não se adequar. Com este exemplo pretende-se evidenciar a necessidade da flexibilidade de ações face ao contexto e circunstâncias que envolvem determinado sistema.

As VRP revelam-se infraestruturas de importância crucial em sistemas de abastecimento de água em locais cuja orografia dita elevadas variações em altitude. Estas componentes dos sistemas podem ser investigadas em diversas perspetivas, entre as quais se sugere: análises custo-benefício da sua instalação; estudo do efeito da redução de pressões na redução de perdas de água; efeito da instalação de VRP com diferentes tipos de modelação (e.g., diurno/noturno); medição de caudais em VRP, por diferencial de pressões, a montante e a jusante; possibilidade de hidrogeração, utilizando microturbinas em substituição ou complemento de VRP.

A análise do nível económico de perdas (NEP) poderá incluir-se numa ferramenta de apoio à decisão, sendo ponderados, de forma conjunta, com o retorno dos investimentos e os cenários de evolução dos sistemas, procurando apoiar a resposta a determinadas questões, de acordo com o tipo, a dimensão e o contexto do sistema: Até onde investir no combate às perdas de água? Como amortizar o investimento em equipamentos

de apoio ao combate às perdas (e.g., prestação de serviços de deteção de fugas e aflúncias)? Que tipo de concursos de prestação de serviços lançar (e.g., por objetivo)? Como investir, de acordo com a dimensão dos sistemas? Qual o equilíbrio entre as soluções convencionais e qual o espaço para a inovação? Como ajustar as metodologias às EG de pequena, média e grande dimensão?

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alegre, H. (2008). *Gestão Patrimonial de Infra-estruturas de Abastecimento de Água e de Drenagem e Tratamento de Águas Residuais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Alegre, H., Coelho, S.T., Leitão, J.P. (2012). *Gestão Patrimonial de Infra-estruturas em Sistemas Urbanos de Água*. Jornadas LNEC, Cidades e Desenvolvimento, 18 a 20 de Junho de 2012, Lisboa.

Almeida, A.B. (2011). *Gestão da Água: Incertezas e Riscos. Conceptualização Operacional*. Esfera do Caos, Lisboa, ISBN 9789896800444

Almeida, O.R.S. (2017). *A Sustentabilidade dos Sistemas de Abastecimento de Água. A Emergência do Combate às Perdas de Água e o Papel do Regulador*. Tese de Doutoramento em Sustentabilidade Social e Desenvolvimento, Universidade Aberta.

Cardoso-Gonçalves, J.J.T. e Tentúgal-Valente, J.C. (2018a). *Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas. Sistema de Abastecimento de Água de Arouca*. 18º Encontro Nacional de Saneamento Básico, 10-12 de Outubro, Porto.

Cardoso-Gonçalves, J.J.T. e Tentúgal-Valente, J.C. (2018b). *Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas. Estudo de Caso: Sistema de Abastecimento de Água de Arouca*. 12ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Porto.

Cardoso-Gonçalves, J. e Tentúgal-Valente, J. (2018c). *Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas. Sistema de Abastecimento de Água de Arouca*. 14.º Congresso da Água, Évora, Portugal.

Cardoso-Gonçalves, J.J.T. (2019). *Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Cardoso-Gonçalves, J.J.T. e Tentúgal-Valente, J.C. (2017). *Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas. Sistema de Abastecimento de Água de Arouca*. 23º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, FEUP, Porto, 15-15 de setembro de 2017.

Covas, D., Cabral, M., Pinheiro, A., Marchionni, V., Antunes, S., Lopes, N., Mamouros, L., Brôco, N. (2018). *Custos de construção de infraestruturas associadas ao ciclo urbano da água - Guia Técnico nº 23*. Entidade Reguladora de Águas e Resíduos e Instituto Superior Técnico.

Hertz, D. B., Thomas, H. (1983). *Risk analysis and its applications*. Wiley: New York, ISBN 9780471101451

Miranda, M.J., Pinto, F. e Pereira, V. (2018). *O Balanço de 2 Anos do "Sistema de Águas da Região do Noroeste" e os Desafios do Desenvolvimento Sustentável*. 18º Encontro Nacional de Saneamento Básico, 10-12 de Outubro, Porto.

# Prótipo do To-SEAlert para o Porto da Ericeira

## To-SEAlert Prototype for Ericeira Harbour

Ana Catarina ZÓZIMO<sup>1</sup>, Conceição J. E. M. FORTES<sup>2</sup>, Liliana V. PINHEIRO<sup>3</sup>, Nathan SMITHERS<sup>4</sup>, Vera SERRAZINA<sup>5</sup>, Maria Teresa REIS<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Eng.ª Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 1700-066, Lisboa, +351.21.8443756, aczozimo@lnec.pt

<sup>2</sup> Eng.ª Civil, LNEC, Av. do Brasil, 1700-066, Lisboa, +351.21.8443445, jfortes@lnec.pt

<sup>3</sup> Eng.ª Civil, LNEC, Av. do Brasil, 1700-066, Lisboa, +351.21.8443451, lpinheiro@lnec.pt

<sup>4</sup> University of Saxion, M. H. Tromplaan 28, 7513 AB Enschede, Países Baixos, nathan\_smithers@hotmail.com

<sup>5</sup> Especialista de Informática, LNEC, Av. do Brasil, 1700-066, Lisboa, +351.21.8443911, vserrazina@lnec.pt

<sup>6</sup> Eng.ª Civil, LNEC, Av. do Brasil, 1700-066, Lisboa, +351.21.8443448, treis@lnec.pt

**RESUMO:** O projeto de investigação e desenvolvimento To-SEAlert financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e envolvendo o LNEC, a FCIências.ID, a NOVA.ID.FCT e o ISEL tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de previsão, alerta, planeamento de emergência e gestão de risco de galgamentos e inundações em zonas costeiras e portuárias, com base no sistema HIDRALERTA. Partindo das características da agitação marítima ao largo e utilizando modelos numéricos para a propagação e deformação da agitação marítima, o sistema HIDRALERTA estima os parâmetros relevantes da agitação marítima para a avaliação do galgamento e da inundação bem como o risco associado a esses eventos. As funcionalidades que se pretendem melhorar no âmbito do projeto To-SEAlert dizem respeito às metodologias de previsão do galgamento e da delimitação da zona inundada, bem como no apoio à resposta a situações de emergência envolvendo fenómenos de galgamento. A implementação e a validação do protótipo do To-SEAlert estão a ser efetuadas para a zona costeira da Costa da Caparica e para o porto da Ericeira.

Este artigo apresenta o trabalho desenvolvido até à data na construção e desenvolvimento do protótipo do To-SEAlert para o porto da Ericeira.

Palavras-chave: Ericeira, To-SEAlert, HIDRALERTA, Galgamento, Previsão e alerta, Emergência.

**ABSTRACT:** *The research and development project To-SEAlert has as its main objective the development of a system responsible for the forecast, alert, emergency planning and risk management for overtopping and flooding in coastal and harbour areas. To-SEAlert project is financed by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia which is the Portuguese public agency that supports science, technology and innovation. The members of the project are LNEC, FCIências.ID, NOVA.ID.FCT and ISEL.*

*The above mentioned system is being developed based on the already existing HIDRALERTA system. Taking into account the offshore wave and wind conditions and with the help of numerical models, the HIDRALERTA system estimates the inshore wave conditions in order to be able to assess wave overtopping and flooding and the risk associated with those events. The To-SEAlert project aims to improve the methodologies both for the wave overtopping assessment and the delineation of flooded areas, and also to serve as a support for the decision making process in emergency situations that involve wave overtopping. The implementation and validation of the To-SEAlert prototype will be performed for the coastal area of Costa da Caparica and the harbour area of Ericeira.*

*This document presents the work developed up to now in the development of the To-SEAlert prototype for Ericeira harbour.*

Keywords: Ericeira, To-SEAlert, HIDRALERTA, Overtopping, Forecast and alert, Emergency.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à frequência e magnitude das tempestades que ocorrem na costa portuguesa, que colocam em perigo populações e infraestruturas portuárias/costeiras, é fundamental que as autoridades responsáveis estejam dotadas de ferramentas para a gestão dos perigos e riscos associados a estes fenómenos.

Embora sejam vários os sistemas de previsão e alerta direcionados para a zona costeira, estes lidam apenas com a inundação devida a níveis de maré elevados e   sobreleva o do nível do mar. Há uma grande lacuna de sistemas direcionados para zonas portuárias em particular, onde o galgamento e a inunda o são devidos às ondas marítimas.

O sistema HIDRALERTA (Fortes *et al.*, 2013, 2014, 2015; Poseiro *et al.*, 2014a, b, 2015, 2017; Garcia *et al.*, 2016; Lopes *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2017; Sabino *et al.*, 2018; Poseiro, 2019)   um sistema de previsão e alerta, e de avalia o do risco da ocorrência de situa es de emergência associadas aos efeitos da agita o marítima (galgamento, inunda o, navega o) em zonas costeiras e portuárias. Este sistema fornece atualmente previsões, com 72 horas de antecedência, das características da agita o marítima, bem como dos níveis de risco.

No entanto, alguns aspetos do sistema têm de ser melhorados e  , neste sentido, que está em curso o projeto To-SEAlert (PTDC/EAM-OCE/31207/2017). O projeto To-SEAlert tem como objetivo a inclusão de um conjunto de ferramentas/metodologias de modo a tornar o sistema mais eficiente, fiável e robusto. Estas ferramentas incluem o uso de imagens de satélite e de vídeo, da modela o numérica e física, métodos quantitativos e probabilísticos para a avalia o do risco e planeamento de emergência, de modo a melhorar a eficiência e a confiança no sistema, bem como proporcionar a sua valida o. Este projeto tem como finalidade principal a implementa o de um sistema que seja capaz de apoiar as autoridades responsáveis na monitoriza o, preven o e gestão de situa es de emergência.

Para alcançar os objetivos propostos para o projeto To-SEAlert, estão previstas sete tarefas, que abrangem i) a valida o dos modelos numéricos de modela o das inunda es costeiras a partir de imagens de satélite (Tarefa 1), a partir de resultados de vídeo-monitoriza o (Tarefa 2) e a partir de resultados de ensaios em modelo físico (Tarefa 3), ii) a implementa o e valida o de procedimentos para simula o de galgamento e inunda o em zonas costeiras e portuárias (Tarefa 4), iii) a implementa o de metodologias quantitativas

para avalia o da exposi o, vulnerabilidade, consequências e risco dos galgamentos oceânicos e consequentes inunda es em termos de custos para infraestruturas estratégicas (Tarefa 5), iv) o desenvolvimento de um sistema de informa o geográfica que inclui toda a informa o das tarefas anteriores (Tarefa 6) e v) a implementa o e valida o do protótipo do To-SEAlert na zona costeira da Costa de Caparica e no porto da Ericeira (Tarefa 7).

O trabalho apresentado no presente artigo enquadra-se no ponto v), nomeadamente na implementa o e valida o do protótipo do To-SEAlert para o porto da Ericeira. Este protótipo baseia-se, nesta primeira fase, na metodologia implementada no sistema HIDRALERTA, estando prevista a implementa o das novas ferramentas e metodologias   medida que as mesmas sejam desenvolvidas no âmbito do projeto To-SEAlert.

Neste artigo, efetua-se primeiramente uma descri o resumida do porto da Ericeira, após a qual   apresentado o protótipo do To-SEAlert. Finalmente, são apresentadas as principais conclusões obtidas no presente trabalho.

## 2. PORTO DA ERICEIRA

O porto da Ericeira (Figura 1) está localizado na costa oeste de Portugal continental, a cerca de 30 km a norte de Lisboa e tem como fun o principal o abrigo a uma pequena frota de pesca artesanal. Com reduzidas dimensões, este porto   constituído pelo molhe, que também funciona como cais de acostagem, e por uma rampa de varadouro.

Deve-se ao porto da Ericeira o desenvolvimento da vila, noutros tempos habitada quase só por pessoas que viviam do mar, que formou durante muitos séculos um grupo étnico-geográfico denominado "Jagoz", diferente dos restantes habitantes da região Saloia. O movimento comercial do porto da Ericeira tornou-o num polo fundamental da economia da região. No século XIX a Alfândega da Ericeira abrangia então uma área que se estendia de Cascais   Figueira da Foz, sendo o seu porto considerado o quarto mais importante do país, atrás dos de Lisboa, Porto e Setúbal. Com a constru o do caminho-de-ferro do Oeste e o desenvolvimento dos transportes terrestres, o porto da Ericeira foi perdendo importância.

Nos finais do século XIX instalaram-se na vila arma es fixas de pesca da sardinha que vieram alterar as antigas características piscatórias, mas que tiveram um papel socioecon mico importante. A vila deixou ao longo do século XIX de ser um entreposto comercial, mas passou a ser

muito procurada por veraneantes devido às suas características climáticas e ao alto teor de iodo das suas praias. Hoje, a Ericeira continua a ser uma das zonas do litoral do país mais procuradas para banhos.

O porto da Ericeira (Figura 1) encontra-se protegido por um molhe-cais do tipo quebra-mar de taludes com 430 m de comprimento, orientado a sudoeste. O molhe-cais é constituído por um prisma de TOT sobre o qual assenta um submanto constituído por duas camadas de enrocamento de 20-40 kN. O manto resistente é constituído por duas camadas de tetrápodos de 300 kN e a cabeça é constituída por cubos Antifer de 550 kN. A seguir ao troço em curva, no tardez, existe um cais acostável.

A construção do molhe da Ericeira apenas começou em 1973, tendo uma primeira configuração sido concluída apenas em finais da década de 70. Desde o início da construção, foram várias as vicissitudes por que passou esta estrutura, umas relacionadas com a ocorrência de alguns temporais durante o período de construção e outras relacionadas com a constatação de que a obra inicialmente prevista deveria ser complementada com um prolongamento do quebra-mar para que o abrigo proporcionado fosse eficaz. Esse prolongamento veio a ser concretizado no início da década de 80. Entretanto, a estrutura sofreu os efeitos de vários

temporais, que foram responsáveis por danos de graus de gravidade variáveis. Em 1987 um temporal destruiu a estrutura, pelo que a mesma teve de passar por várias obras de reabilitação: em 1987, de junho de 2008 a outubro de 2009, em 2010 (Silva, 2017, Capitão *et al.*, 2018) e, recentemente, entre 2018 e 2019, com a reabilitação da cabeça do quebra-mar.

Infelizmente, após a finalização da obra, as tempestades Fabien e Elsa, que ocorreram em dezembro de 2019, conduziram a um dano significativo na cabeça do quebra-mar, pelo que brevemente será necessário proceder a novas obras de reabilitação.

### 3. PROTÓTIPO DO TO-SEALERT PARA O PORTO DA ERICEIRA

#### 3.1 Metodologia

O protótipo para o porto da Ericeira está a ser construído a partir dos protótipos do sistema HIDRALERTA que se encontram já em funcionamento para os portos da Praia da Vitória na ilha da Terceira e de São Roque do Pico e da Madalena do Pico, na ilha do Pico, do Arquipélago dos Açores. Para a implementação do protótipo para o porto da Ericeira,



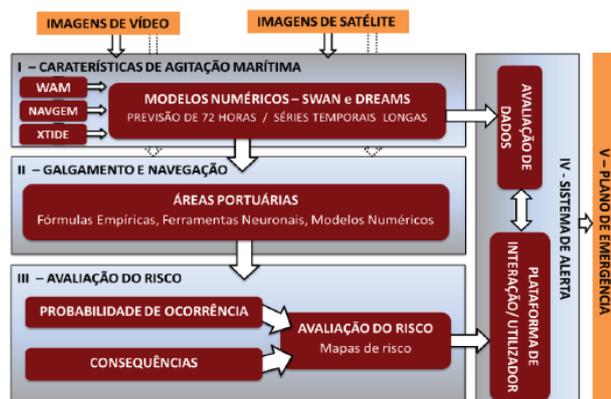
**Figura 1.** Localização geográfica em Portugal continental do molhe do porto da Ericeira.

foi necessário proceder à recolha de informação sobre o porto (projeto do porto, tipo de estruturas e seu material constituinte), à adaptação dos modelos de caracterização da agitação marítima ao porto da Ericeira (definição e construção de malhas, recolha de informação batimétrica), à identificação dos equipamentos e usos que poderão estar em perigo em caso de galgamento e adaptação da arquitetura do sistema HIDRALERTA para o seu funcionamento no porto da Ericeira.

Para o risco associado aos galgamentos/inundações a metodologia do HIDRALERTA consiste basicamente em:

- Definir o regime de agitação marítima incidente nas estruturas costeiras ou portuárias recorrendo a resultados de modelos numéricos de propagação de ondas;
- Calcular a resposta da estrutura em termos de caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, com a ferramenta baseada em resultados de redes neuronais artificiais (“ferramenta neuronal”) NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), desenvolvida no âmbito do Projeto Europeu CLASH;
- Calcular o grau de risco associado à ocorrência de galgamentos acima de um determinado limiar pré-definido, em função do tipo de estrutura galgada e das atividades e bens por ela protegidos.

O sistema está implementado numa plataforma web e é constituído por quatro módulos: I - Características da Agitação Marítima; II – Galgamento / Inundação; III - Avaliação do Risco; e IV - Sistema de Alerta (Figura 2).



**Figura 2.** Metodologia do sistema HIDRALERTA. Adaptado de Poseiro (2019).

Descreve-se, em seguida, cada um dos módulos do sistema HIDRALERTA e que correspondem,

respetivamente, ao módulo de definição das características da agitação marítima, ao módulo de galgamento e navegação, ao módulo de avaliação do risco e ao módulo do sistema de alerta. Durante a descrição dos módulos, serão apresentados os desenvolvimentos efetuados para a implementação do protótipo para o porto da Ericeira.

### 3.2 Módulo I – Caracterização da agitação marítima

No módulo I, são obtidas as previsões disponibilizadas pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) da agitação marítima ao largo da zona de estudo e do campo de ventos. O nível do mar é definido a partir da previsão de maré astronómica do modelo XTIDE (Flatter, 1998). As condições de agitação marítima são transferidas do largo para a zona costeira ou de entrada do porto, com recurso ao modelo de propagação de ondas SWAN (Booij *et al.*, 1999; SWAN Team, 2006). Para as zonas onde tenha de ser considerada a reflexão de estruturas marítimas (como nas zonas portuárias) é utilizado o modelo DREAMS (Fortes, 2002) com as condições de fronteira fornecidas pelo modelo SWAN.

O modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999; SWAN Team, 2006), acrónimo de *Simulating WAVes Nearshore*, é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da ação de onda. Trata-se de um modelo de domínio público (*freeware*), em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology*, da Holanda, que possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados, o que permite a fácil atualização de versões mais robustas e completas do modelo sempre que necessário. Propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refração e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitcapping*), dissipação de energia devido ao atrito de fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade espectral da ação de onda. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas.

DREAMS (Fortes, 2002), é um modelo numérico para o cálculo da propagação e deformação de ondas regulares em zonas costeiras. O modelo pode ser

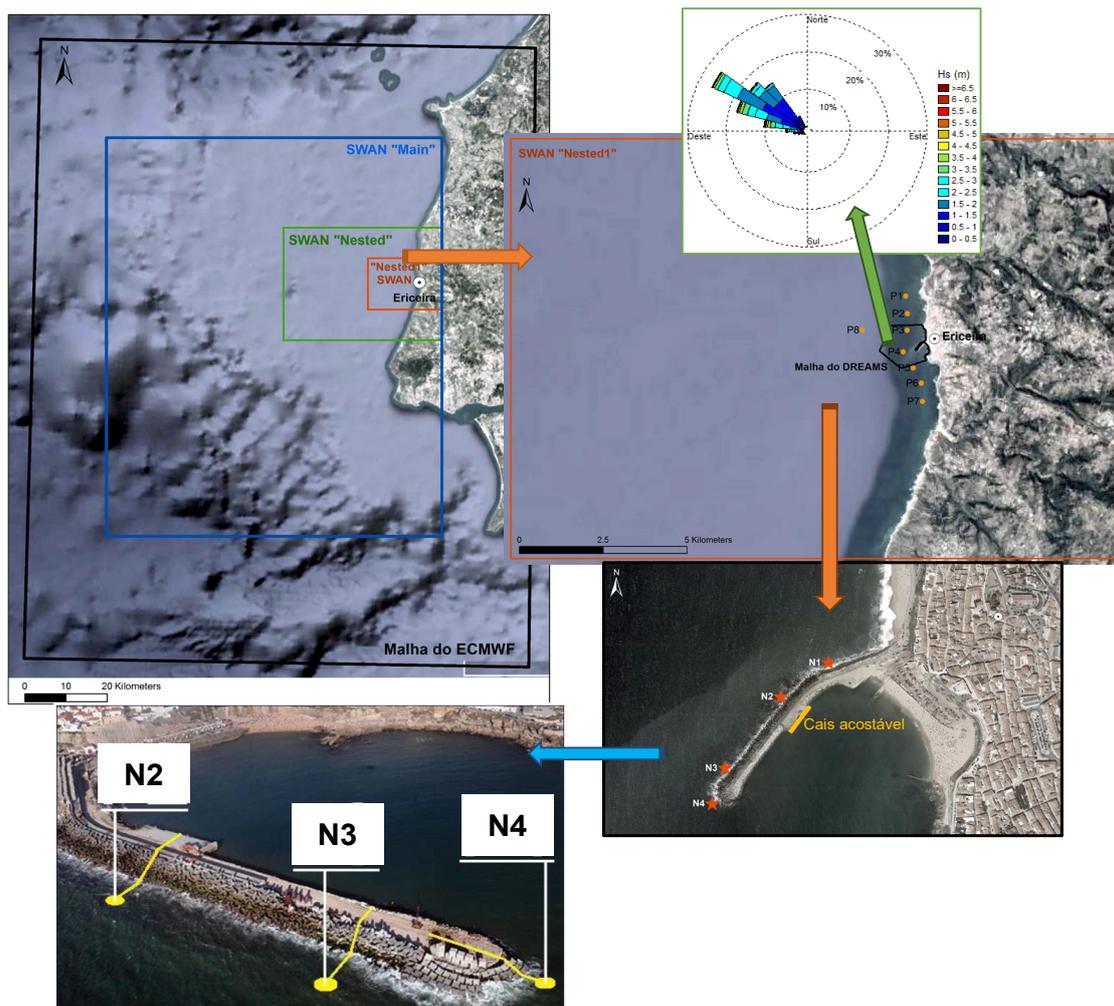
aplicado no estudo, quer da penetração num porto da agitação marítima de período curto, quer da ressonância de uma bacia portuária excitada por ondas de longo período nela incidentes. É baseado na equação elíptica de declive suave, Berkhoff (1972), que descreve os efeitos combinados da refração e difração de ondas monocromáticas propagando-se em fundos de inclinação suave, como os que ocorrem geralmente em portos, baías e zonas costeiras. O método numérico utilizado para a resolução da equação de declive suave é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O modelo não tem em conta os efeitos da rebentação das ondas, da presença de correntes, nem de eventuais galgamentos das obras de abrigo. As condições de fronteira podem ser de três tipos: condições de radiação, que permitem a saída de perturbações geradas no domínio no sentido de propagação para o infinito, condições de geração e radiação combinadas, como as relativas a fronteiras abertas, e condições de reflexão (total ou parcial), referentes aos contornos sólidos da zona em estudo (praias, falésias, molhes, cais, etc.). O modelo calcula índices de agitação,  $H/H_0$ , relação entre a altura de onda no ponto do domínio de

cálculo,  $H$ , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo,  $H_0$ , ou coeficientes de amplificação (em estudos de ressonância portuária) e direções de propagação da onda. O campo de velocidades horizontais na superfície livre e as cristas das ondas (linhas de igual fase) constituem resultados opcionais.

O nível do mar foi determinado a partir da previsão de maré astronómica do modelo XTIDE.

De forma a efetuar a propagação desde o largo até à costa, foram utilizadas três malhas encaixadas (Figura 3) para o modelo SWAN (Main, Nested e Nested1) e uma malha local para o modelo DREAMS. As condições de fronteira para o modelo DREAMS foram definidas com base nos resultados do modelo SWAN obtidos no ponto P4 (Figura 3) A estimativa dos galgamentos foi efetuada em quatro pontos, N1 a N4 (Figura 3), cujas condições de agitação foram definidas com o modelo DREAMS.

Na Figura 4 e na Figura 5 são apresentados os resultados dos modelos SWAN (malha Nested 1) e DREAMS para o dia 09/02/2021 às 15 horas, conforme apresentados no sistema HIDRALERTA.



**Figura 3.** Malha do ECMWF, domínios computacionais do SWAN (Main, Nested e Nested1) e do DREAMS, pontos de extração dos resultados do SWAN (P1 a P8) e pontos para a estimativa dos galgamentos (N1 a N4).

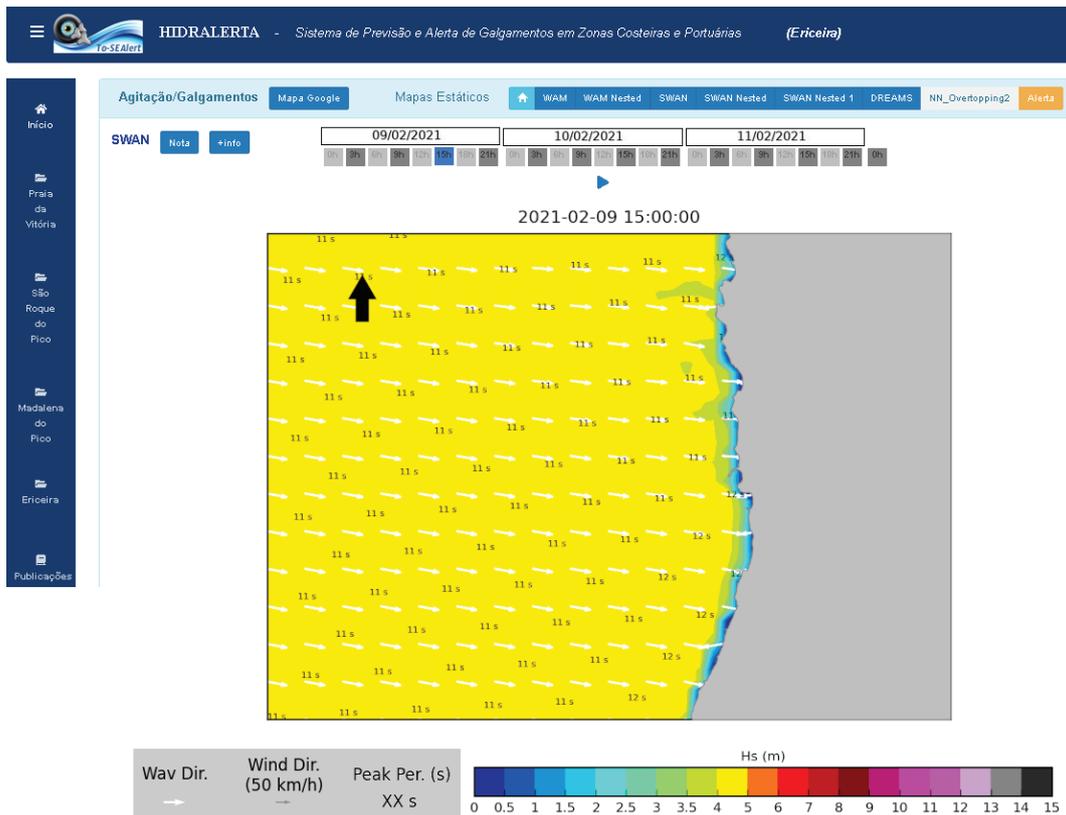


Figura 4. Resultados do modelo SWAN para a malha SWAN Nested 1 no dia 09/02/2021 às 15 horas.

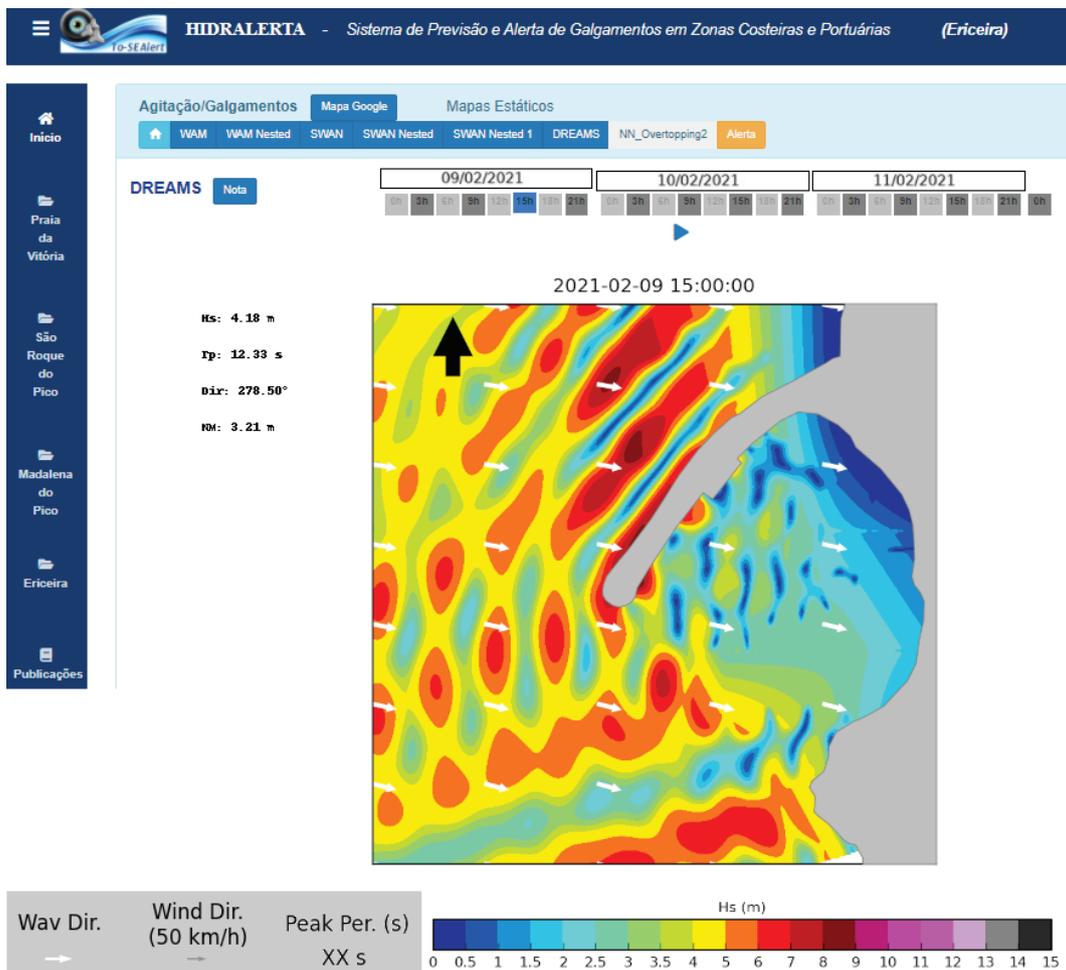


Figura 5. Resultados do modelo DREAMS no dia 09/02/2021 às 15 horas.

### 3.3 Módulo II – Galgamentos

Embora o sistema HIDRALERTA contemple no módulo II os aspetos associados tanto aos galgamentos, como à navegação, no projeto To-SEAlert apenas vão ser considerados os galgamentos.

O módulo II utiliza a ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) para determinar o caudal médio galgado correspondente a uma dada condição de agitação marítima/nível de maré verificada em cada secção das estruturas analisadas na zona de estudo. Os dados de entrada de agitação são os estimados com o módulo I.

A ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) foi desenvolvida no âmbito do projeto europeu CLASH (Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005, 2007). Esta ferramenta processa os resultados produzidos por 700 redes neuronais artificiais, cujos parâmetros de entrada incluem informação sobre a agitação marítima/nível de maré e a geometria da estrutura.

São considerados quinze parâmetros de entrada. Três parâmetros descrevem a agitação marítima incidente na estrutura e 12 parâmetros descrevem a forma geométrica do perfil da estrutura (Figura 6). Os resultados são o valor do caudal médio galgado

por unidade de comprimento do coroamento da estrutura,  $q$ , bem como outros valores característicos desta grandeza obtidos a partir da amostra gerada pelo conjunto de 700 redes neuronais artificiais. Esta ferramenta tem como base um conjunto alargado de ensaios de galgamento realizados em modelo físico reduzido e em protótipo.

Para a caracterização da estrutura, foram utilizados os perfis transversais, em formato *AutoCad*, do Projeto de empreitada de reabilitação/reconstrução do molhe-cais do quebra-mar do porto da Ericeira da empresa *Irmãos Cavaco, S.A.*, sob jurisdição do IPTM. Na Figura 7 são apresentados os quatro perfis considerados com a indicação do respetivo corte transversal no canto superior esquerdo. Esses quatro perfis representam pontos de referência sinalizados no âmbito do programa OSOM (Silva, 2017).

No Quadro 1 são apresentados os valores considerados no protótipo atual para o porto da Ericeira para os doze parâmetros que descrevem a forma geométrica do perfil da estrutura na ferramenta NN\_OVERTOPPING2. Esses valores serão ainda sujeitos a validação.

Na Figura 8 são apresentados os resultados do modelo NN\_OVERTOPPING2 para o dia 09/02/2021 às 15 horas, conforme apresentados no sistema HIDRALERTA.

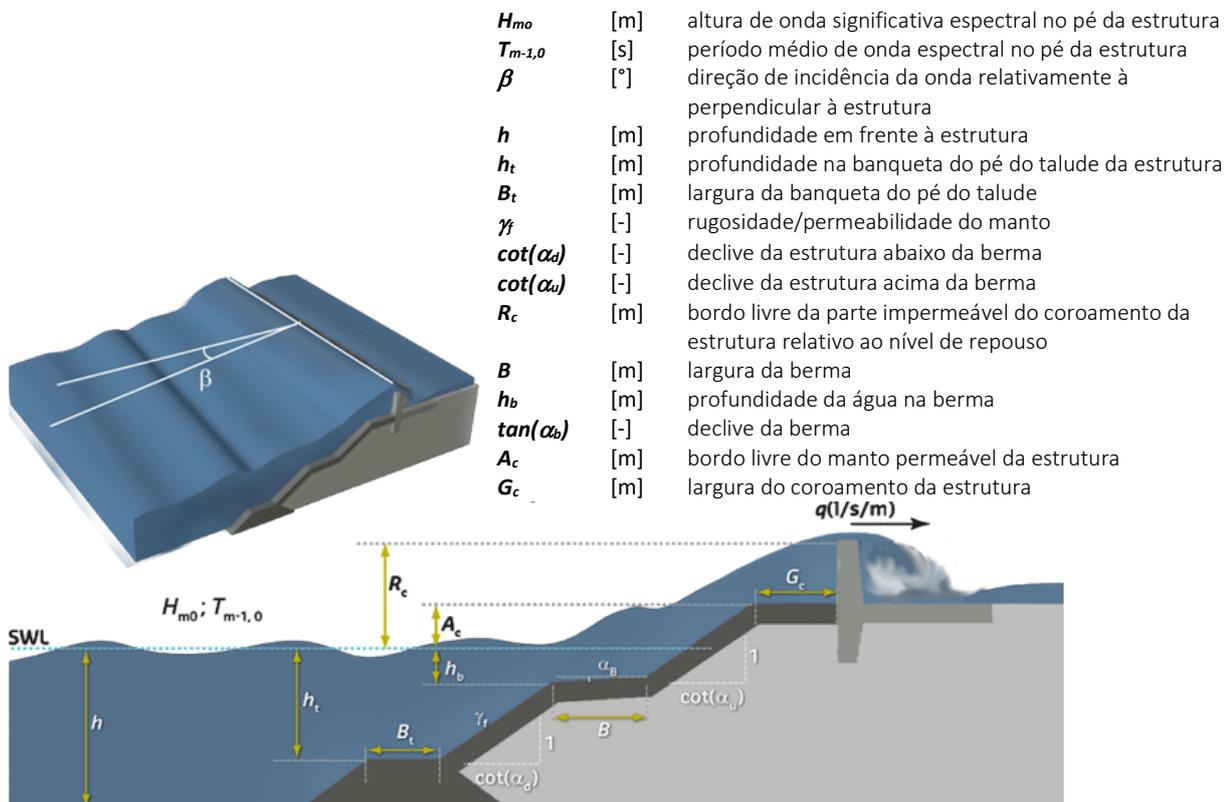
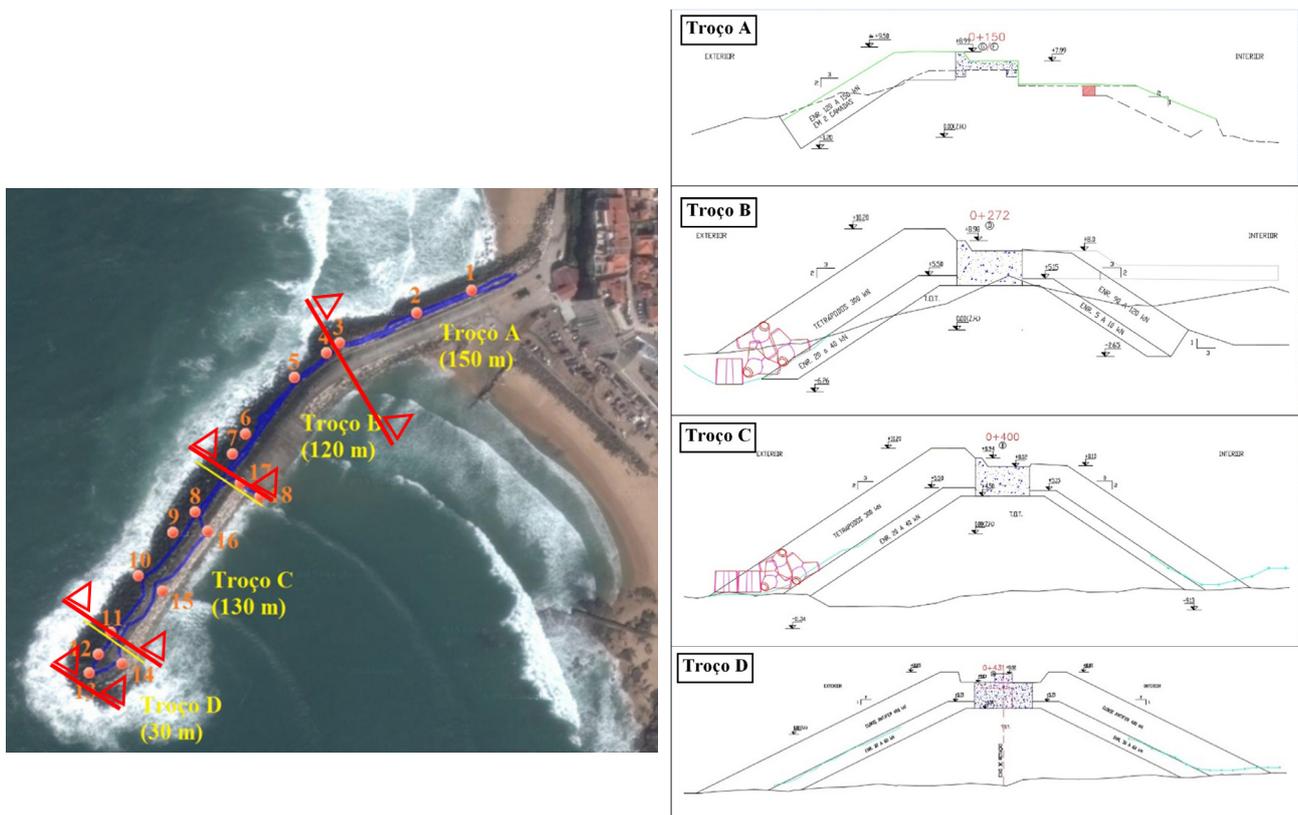


Figura 6. Parâmetros de entrada da ferramenta NN\_OVERTOPPING2 (Adaptado de Deltares).



**Figura 7.** Quebra-mar do porto da Ericeira. Esq.: divisão da estrutura em troços com pontos de referência no âmbito do programa OSOM, dir.: Cortes transversais dos troços A a D (adaptado de Silva, 2017).

**Quadro 1.** Valores considerados para os doze parâmetros que descrevem a forma geométrica do perfil da estrutura na ferramenta NN\_OVERTOPPING2. N.M. significa Nível de Mar e N.A. significa Não Aplicável.

	Troço A	Troço B	Troço C	Troço D
$h$	1.2+N.M.	3.35+N.M.	8.35+N.M.	10.53+N.M.
$h_t$	1.2+N.M.	3.35+N.M.	8.35+N.M.	10.53+N.M.
$B_t$	0	0	0	0
$g_f$	0.50	0.45	0.45	0.50
$cot(a_d)$	0	0	0	0
$cot(a_e)$	1.542	1.541	1.541	1.533
$R_c$	9.00+N.M.	9.00+N.M.	8.93+N.M.	10.53+N.M.
$B$	0	0	0	0
$h_b$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
$tan(a_b)$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
$A_c$	6.25+N.M.	10.20+N.M.	10.20+N.M.	10.85+N.M.
$G_c$	6.91	3.68	3.86	4.59

### 3.4 Módulo III – Avaliação do risco

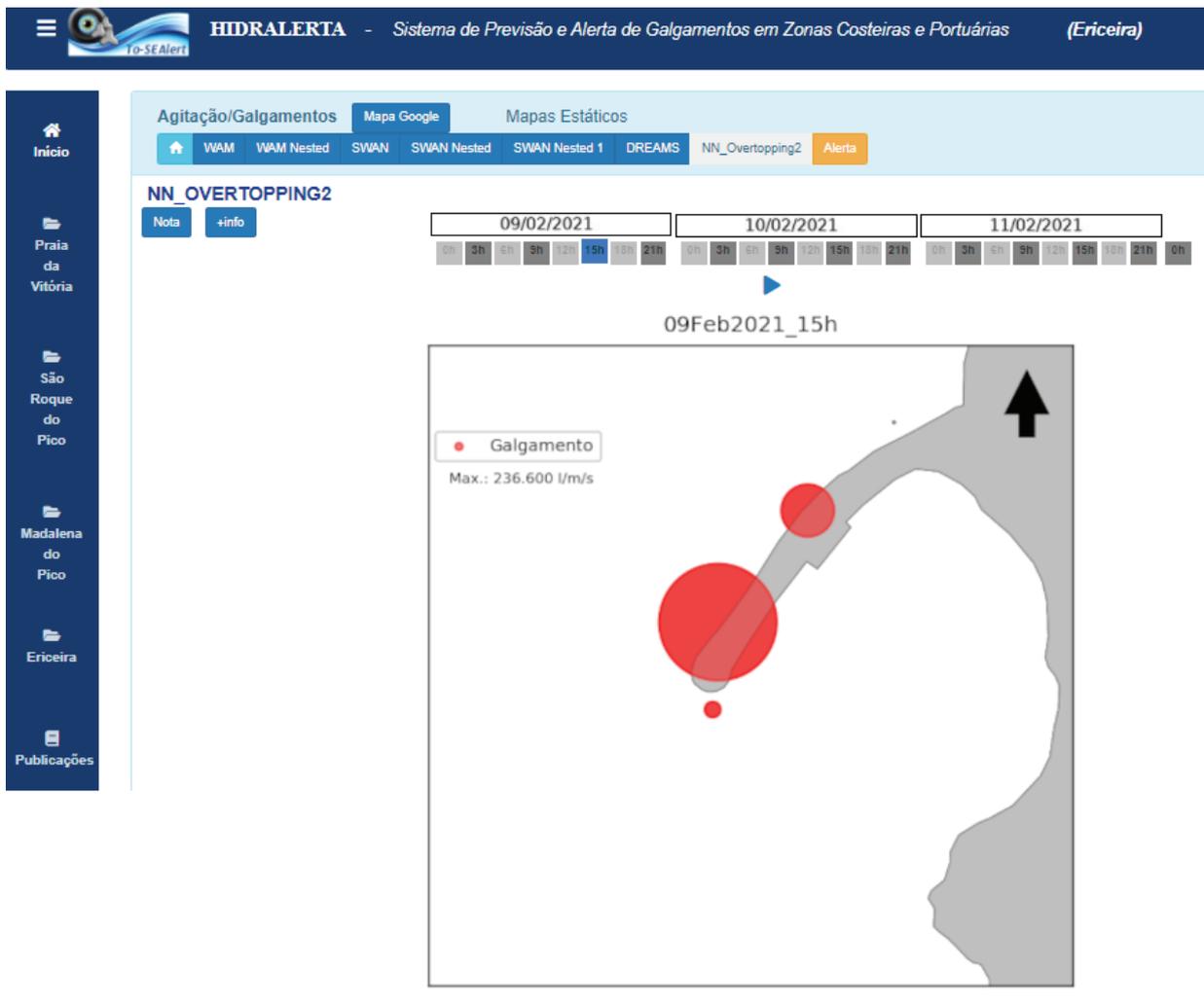
No módulo III é efetuada a avaliação do risco de galgamento.

Atualmente, a avaliação de risco é efetuada recorrendo à definição de níveis de risco de 0 a 3,

em que 0 corresponde à não existência de risco e 3 corresponde ao nível mais elevado de risco.

O processo de avaliação qualitativa do risco de galgamentos de uma estrutura marítima é efetuado da seguinte forma na versão atual do protótipo para o porto da Ericeira:

- Divisão do local de estudo em subzonas, atendendo ao perfil transversal da estrutura e ao tipo de utilização da zona protegida pela estrutura e, conseqüentemente, à variabilidade do caudal médio admissível de galgamento;
- Estabelecimento dos caudais críticos de galgamento associados a cada secção de estrutura analisada tendo em conta a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada. Estes limiares são estabelecidos com base nas recomendações de Pullen *et al.* (2007) e em informação fornecida pelas autoridades locais;
- Definição dos níveis de risco 0 a 3 para cada atividade desenvolvida, com base nos caudais críticos de galgamento associados. Estes níveis de risco devem ser definidos em conjunto com as autoridades locais.



**Figura 8.** Resultados do modelo NN\_OVERTOPPING2 no dia 09/02/2021 às 15 horas.

Como referido, atualmente no protótipo da Ericeira são considerados quatro troços, A a D, sendo que que a agitação incidente em cada um desses troços é definida nos pontos N1 a N4 (Figura 3) com o modelo DREAMS, respetivamente.

No Quadro 2 são apresentadas as atividades consideradas atualmente no sistema HIDRALERTA, com referência aos limiares de caudal de galgamento considerados para a definição dos níveis de risco. São também assinaladas as atividades consideradas em cada um dos troços no porto da Ericeira, definidas com base no trabalho desenvolvido por Smithers (2019). É de notar que os limiares de caudal de galgamento considerados para a definição dos níveis de risco são os adotados para os portos que já estão inseridos no sistema HIDRALERTA, pelo que esses limiares terão de ser confirmados/ajustados a curto prazo para o porto da Ericeira juntamente com as autoridades responsáveis.

No Quadro 3 é apresentado o código de cores convencionalizado no sistema HIDRALERTA para os graus de risco de 0 a 3 para cada atividade.

### 3.5 Módulo IV – Sistema de alerta

O módulo IV permite a previsão das situações de emergência para uma determinada área de interesse e permitirá no futuro o envio automático, por correio eletrónico, de mensagens de alerta para as autoridades responsáveis. Este módulo cria e disponibiliza todos os resultados do sistema através de uma plataforma web (aurora.lnec.pt, de acesso restrito): previsões a 3 dias e resultados obtidos nos módulos I, II e III. A plataforma web contém um conjunto de funcionalidades, das quais se destacam os mapas de alerta, que assinalam os elementos/atividades que se podem encontrar em perigo.

O sistema de alerta está a ser construído de forma dinâmica, através de um conjunto de *scripts* que acoplam os vários modelos e automatizam os procedimentos para o funcionamento do sistema. A parte *web* está a ser concebida com recurso a ferramentas de desenvolvimento web e a sistemas de gestão de base de dados abertos.

O sistema de alerta (Rodrigues *et al.*, 2017; Poseiro *et al.*, 2017; Sabino *et al.*, 2018; Poseiro, 2019) é

**Quadro 2.** Atividades e respetivos limiares para os graus de risco de 0 a 3. A violeta assinalam-se as atividades consideradas no troço A, a cor azul assinalam-se as atividades consideradas nos troços A e B e a cor laranja assinalam-se as atividades consideradas nos troços A, B, C e D. Adaptado de Poseiro (2019).

N.º	Símbolo	Descrição	Nível de Alerta			
			0 q (l/s/m)	1 q (l/s/m)	2 q (l/s/m)	3 q (l/s/m)
1		Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de que se podem molhar, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar <sup>1</sup>	< 1,0	[1,0 – 5,0[	[5,0 – 10,0[	≥ 10,0
2		Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga <sup>1</sup>	< 0,1	[0,1 – 0,5[	[0,5 – 1,0[	≥ 1,0
3		Pessoas totalmente desprevenidas, que não conseguem observar a agitação incidente, que podem facilmente ficar assustadas ou perturbadas, com vestuário inapropriado para se molharem ou que se desloquem numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas <sup>1</sup>	< 0,01	[0,01 – 0,02[	[0,02 – 0,03[	≥ 0,03
4		Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair na via, veículo não imerso <sup>2</sup>	< 10,0	[10,0 – 25,0[	[25,0 – 50,0[	≥ 50,0
5		Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projetado com grande velocidade ou com jatos de água a cair na via que podem imergir o veículo <sup>3</sup>	< 0,01	[0,01 – 0,03[	[0,03 – 0,05[	≥ 0,05
6		Danos significativos ou afundamento de iates de grandes dimensões	< 10,0	[10,0 – 25,0[	[25,0 – 50,0[	≥ 50,0
7		Afundamento de pequenas embarcações que estejam afastadas 5-10 m da estrutura. Danos em iates de grandes dimensões <sup>4</sup>	< 2,0	[2,0 – 5,0[	[5,0 – 10,0[	≥ 10,0
8		Danos nos elementos estruturais dos edifícios <sup>5</sup>	< 0,2	[0,2 – 0,5[	[0,5 – 1,0[	≥ 1,0
9		Danos a equipamentos recuados em 5-10 m	< 0,2	[0,2 – 0,3[	[0,3 – 0,4[	≥ 0,4
10		Sem danos se o coroamento e o tardoiz estiverem bem protegidos	< 200,0	[200,0 – 300,0[	[300,0 – 400,0[	≥ 400,0
11		Sem danos no coroamento e no tardoiz de um dique de argila coberto por relva	< 1,0	[1,0 – 5,0[	[5,0 – 10,0[	≥ 10,0
12		Sem danos no coroamento e no tardoiz mesmo se não estiverem protegidos	< 0,02	[0,02 – 0,05[	[0,05 – 0,1[	≥ 0,1
13		Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal	< 25,0	[25,0 – 100,0[	[100,0 – 200,0[	≥ 200,0
14		Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas	< 10,0	[10,0 – 25,0[	[25,0 – 50,0[	≥ 50,0

1 Estas condições não têm de se verificar todas em simultâneo.

2 O limite superior, correspondente ao nível 3, refere-se ao galgamento efetivo obtido na via de circulação.

3 O limite superior, correspondente ao nível 3, está relacionado com o galgamento obtido na estrutura marítima, mas é assumido que a via de circulação se encontra imediatamente atrás da estrutura.

4 Estes limites referem-se a galgamentos obtidos na zona da defesa.

5 O limite superior, correspondente ao nível 3, refere-se ao galgamento efetivo obtido no edifício.

**Quadro 3.** Código de cores convencionado no sistema HIDRALERTA para os graus de risco de 0 a 3.

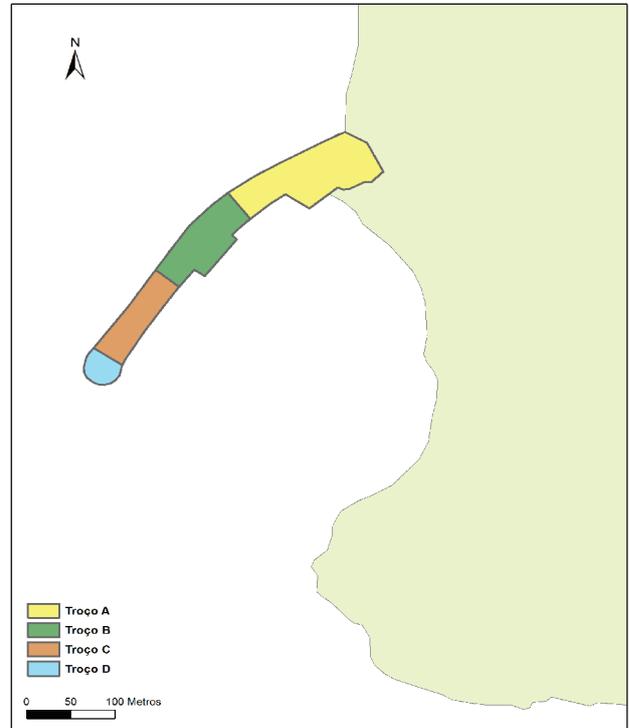
	Nível de Alerta			
	0	1	2	3
Símbolo				

constituído por duas componentes: a componente de avaliação de dados e a componente de interação com o utilizador.

Na componente de avaliação de dados, o sistema parte do princípio que o nível de alerta associado à área de interesse é determinado de acordo com os limiares de galgamento/inundação alcançados em cada secção das estruturas analisadas e para cada atividade. Desta forma, é atribuído um nível de alerta a cada secção considerada homogénea, assim como um nível de alerta a cada atividade. No porto da Ericeira foram consideradas quatro secções homogéneas que correspondem, como já foi referido, aos quatro troços analisados no âmbito do programa OSOM, Figura 9.

O nível de alerta de cada secção homogénea é dado pelo nível mais elevado de alerta das atividades consideradas nessa secção. Consequentemente, basta uma das atividades atingir o nível 3 de alerta para que esse troço fique com o nível de alerta 3. Para o funcionamento do sistema de alerta têm de estar definidos, com base no estudo de avaliação do risco realizado no módulo III do sistema, os limites para os caudais médios admissíveis. Esses limites já têm em conta as consequências dos acontecimentos perigosos de galgamento/inundação em cada zona pelo que, em caso de estes limites serem excedidos, é acionado o sinal de alerta, bem como a sua localização num mapa. Torna-se, portanto, particularmente relevante conseguir a melhor caracterização possível de cada secção, tendo em conta as suas características e as atividades que nela acontecem, bem como uma análise profunda de galgamentos/inundações registados anteriormente. Os resultados gerados pelo componente de avaliação assumem diversas formas, nomeadamente, gráficos, mapas e relatórios. Estes são depois transmitidos à componente de interação com o utilizador para permitir a avaliação da situação pelo mesmo.

A componente de interação com o utilizador está materializada numa aplicação web desenhada para trabalhar com browsers tradicionais e móveis, adequando a informação às características do dispositivo do cliente (Figura 10). O sistema permite



**Figura 9.** Troços/secções homogéneas consideradas para o porto da Ericeira.

a análise de dados através de gráficos e mapas, que permitem a visualização espacial dos riscos e consequências associados à área de interesse. Cada mapa contém a identificação de pontos e áreas consideradas relevantes.

Está prevista a existência, no futuro, de vários perfis de utilização do sistema. Esses perfis serão definidos para cada caso de estudo tendo em conta a existência ou não de informação sensível. As autoridades responsáveis serão recetoras de mensagens de alerta enviadas pelo sistema, sempre que um novo alerta for criado. As condições de envio e o conteúdo destas mensagens serão definidas por protocolos estabelecidos com as autoridades.

Na Figura 11 são apresentados os resultados do módulo da avaliação do risco para o dia 09/02/2021 às 15 horas, conforme apresentados no sistema HIDRALERTA.

Tal como se apresenta na Figura 11 para o porto da Ericeira, os mapas de alerta destacam as secções

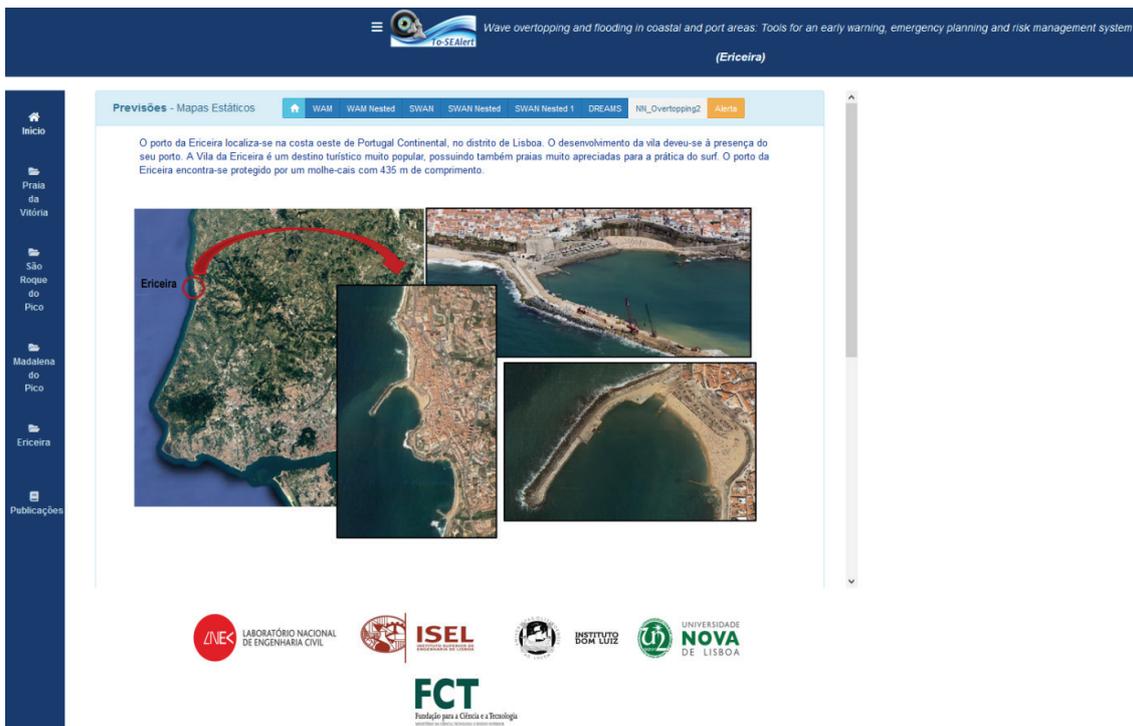


Figura 10. Página inicial da aplicação web do sistema HIDRALERTA para o porto da Ericeira.

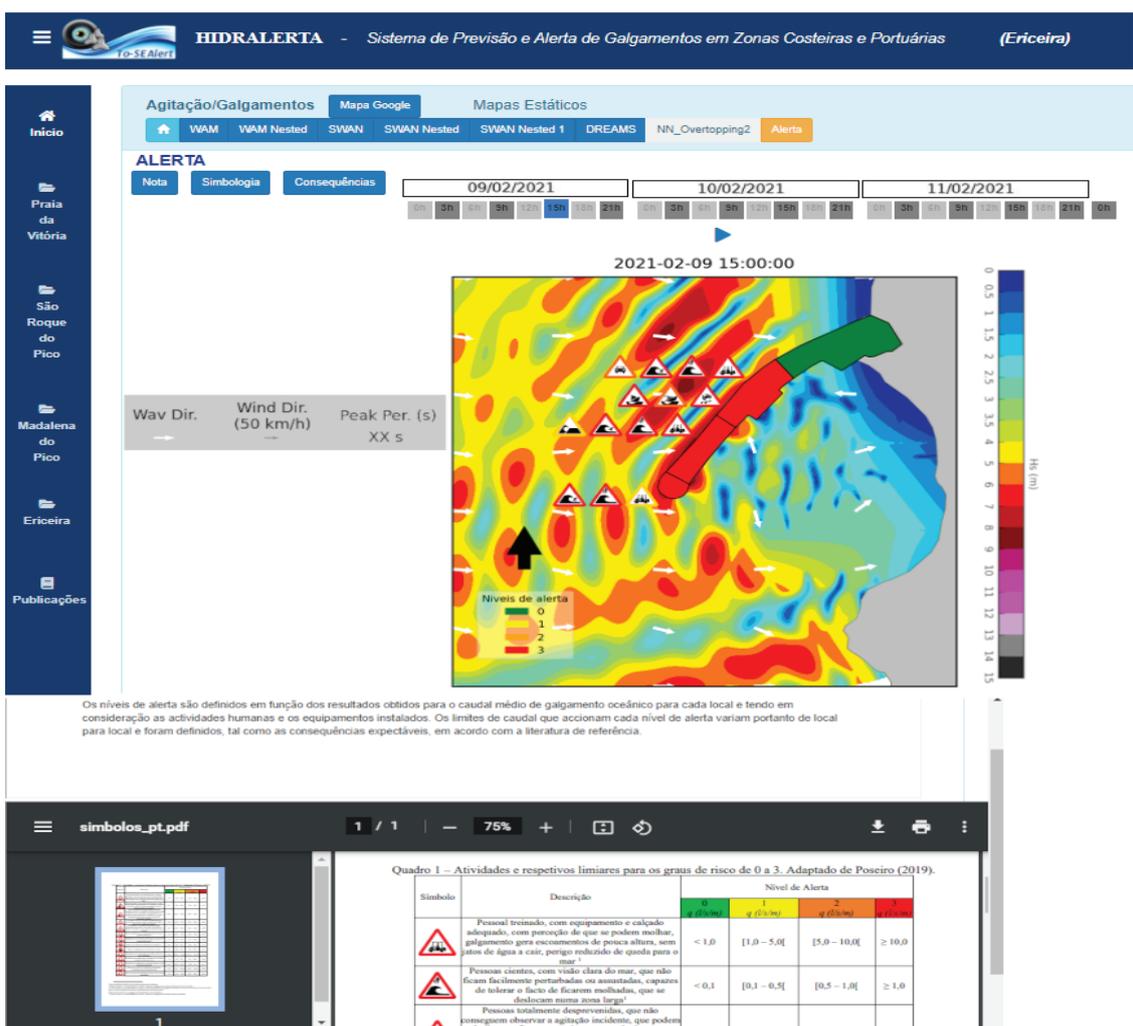


Figura 11. Resultados do módulo da avaliação do risco no dia 09/02/2021 às 15 horas.

em perigo, sendo identificados os elementos/atividades que podem ser afetados dentro de cada secção. Nestes alertas é ainda possível observar a agitação marítima dentro do porto, através dos parâmetros altura significativa da onda e direção de onda obtidos com o modelo DREAMS.

Os resultados gerados pelos diferentes modelos numéricos são apresentados em vários formatos. Todos os resultados relevantes são apresentados sobre forma estática através de imagens, para serem facilmente e rapidamente legíveis, mesmo quando o utilizador tenha um acesso à rede limitado.

Diariamente é emitido um boletim, que agrega a informação correspondente aos alertas para as 72 horas de previsão. Os boletins, independentemente da previsão, serão enviados diariamente para as entidades com responsabilidades na gestão da zona costeira e portuária.

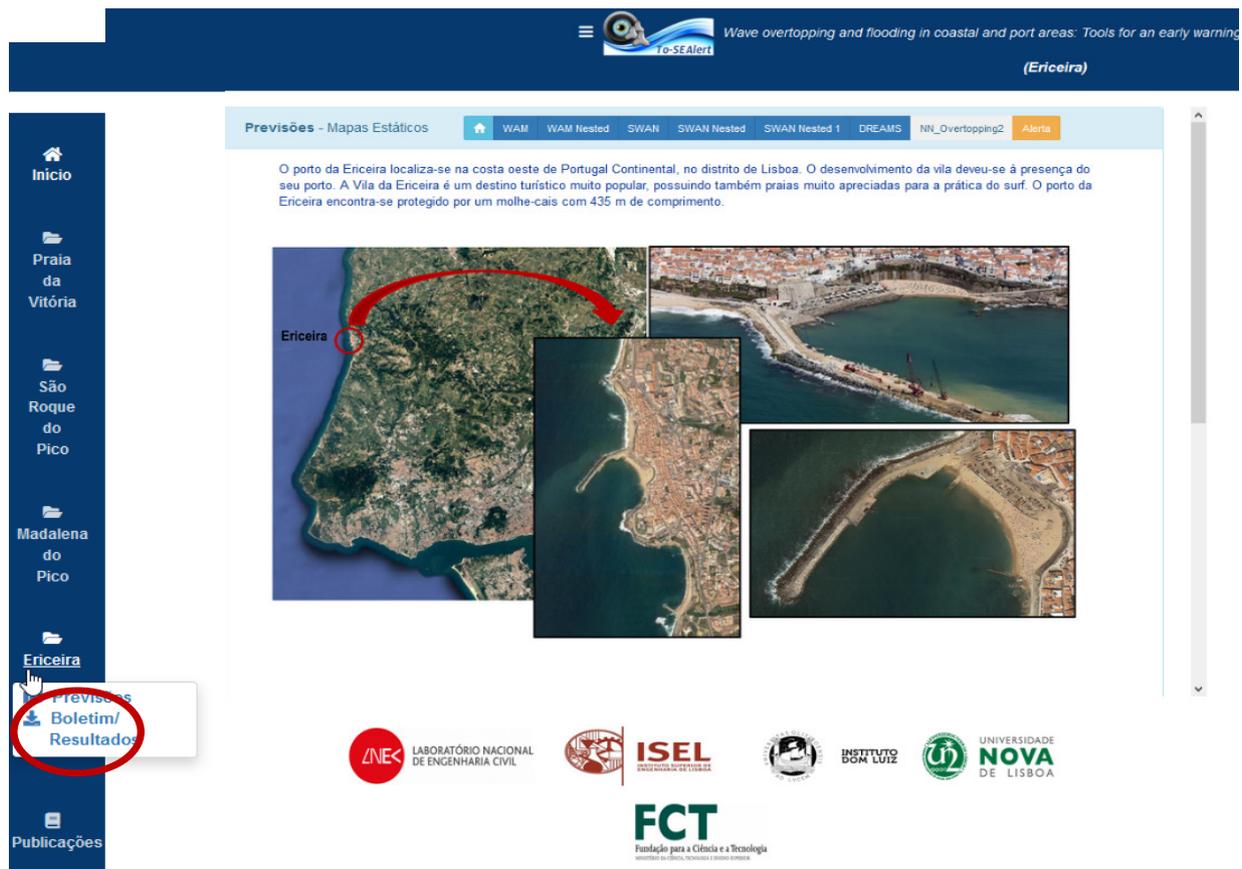
O boletim pode também ser consultado através da aplicação web, conforme ilustrado na Figura 12.

Esta iniciativa permite, simultaneamente:

- Alertar, com 72 horas de antecedência, para a possibilidade de ocorrência de temporais com potencial para originarem galgamentos com consequências;
- Identificar falhas computacionais do sistema que atrasem ou inviabilizem a disponibilização diária de previsões;
- Validar o sistema no que se refere à ocorrência e magnitude dos galgamentos, através do feedback recebido das entidades locais;

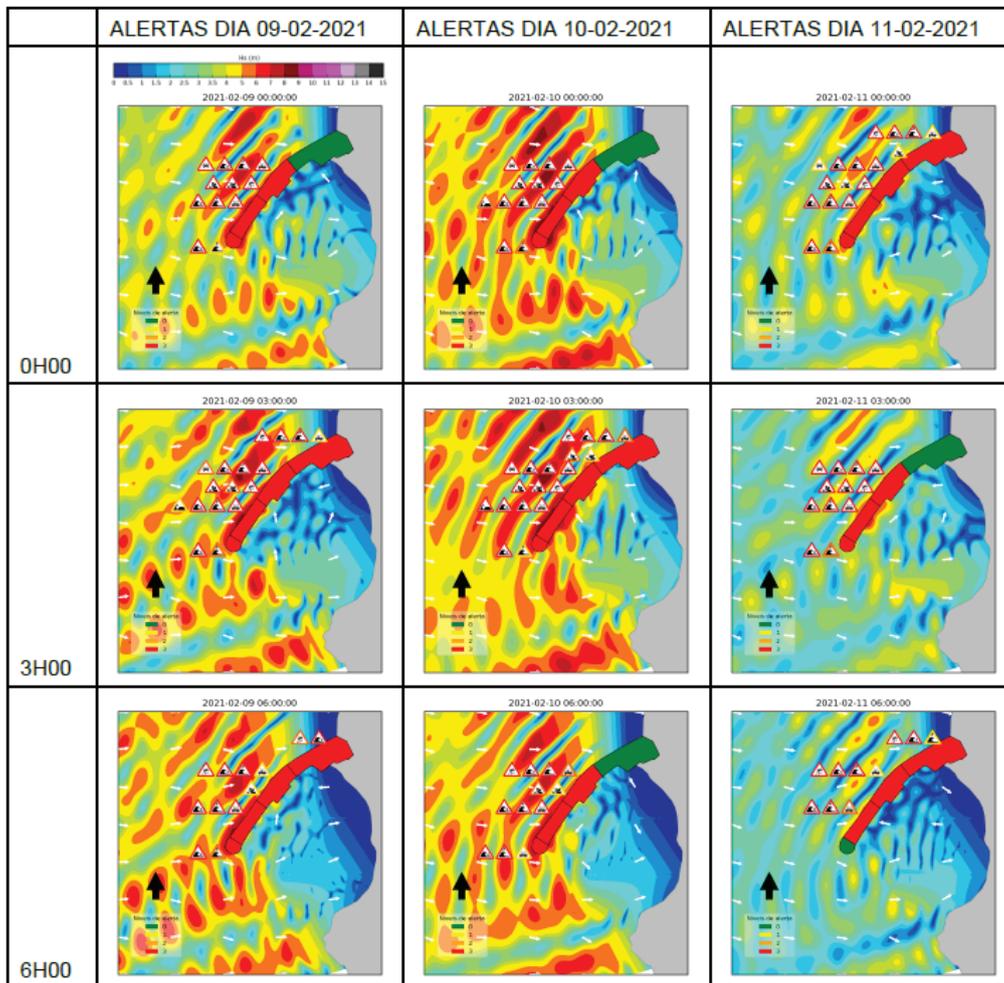
Para além do envio diário de boletins, nos casos mais gravosos em que as previsões anteveem risco para atividades, pessoas ou estruturas na zona em estudo, será futuramente acionado um sistema de envio de alerta para as principais entidades de gestão da zona costeira e portuária.

Na Figura 13 é apresentado o boletim do dia 09/02/2021, conforme apresentado no sistema HIDRALERTA.



**Figura 12.** Funcionalidade para consulta do boletim diário e dos boletins dos dias anteriores na aplicação web do sistema HIDRALERTA.

**PROJETO To-SEAlert Previsão de galgamentos costeiros**  
**Ericeira, Portugal Continental**  
**09Feb2021 00h00 GMT**



**Figura 13.** Extrato do boletim do dia 09/02/2021.

### CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Considera-se que, embora ainda exista algum trabalho a desenvolver, o protótipo para o porto da Ericeira já se encontra funcional e a realizar previsões a cada 3 horas.

Como trabalho futuro a desenvolver no protótipo para o porto da Ericeira, realça-se a validação dos resultados do modelo SWAN que será efetuada com os dados das boias da Nazaré (oceânica e costeira), assim como a utilização das imagens da câmara de vídeo-monitorização instalada no antigo Posto Territorial da GNR da Ericeira para a validação da ocorrência de galgamentos e inundação e para a

validação dos resultados dos modelos numéricos. Será também efetuada a aferição dos limiares dos caudais críticos de galgamento associados a cada troço analisado.

### AGRADECIMENTOS

Agradece-se aos projetos To-SEAlert - Wave overtopping and flooding in coastal and port areas: Tools for an early warning, emergency planning and risk management system, Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017 e BSAFE4SEA - Breakwaters SAFETy control through a FORecast and decision support SysEm Analysis, Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017.

## BIBLIOGRAFIA

- BERKHOFF, JCW – “Computations of combined refraction-diffraction”, in Proc. 13th Coastal Engineering Conference, Chapter 24, 1972.
- BOOIJ, N; RIS, RC & HOLTHUIJSEN, LH – “A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation”, *J. Geographical Res.*, C4, 104, 1999, pp. 7649-7666.
- CAPITÃO, R., FORTES, C.J.E.M.; LEMOS, R., 2018 - OSOM 2016 – “Observação Sistemática de Obras Marítimas - Estruturas Marítimas da Costa Oeste de Portugal Continental campanhas de observação visual efetuadas em 2016”. Relatório 278/2018 – DHA/NPE, julho, 2018.
- COVELD, EM; van GENT, MRA & POZUETA, B - *Neural Network: Manual NN\_OVERTOPPING2*, CLASH WP8 – Report BV, 2005.
- FLATER, D - *XTide Manual: Harmonic Tide Clock and Tide Predictor*. Technical Report, USA, 1998, <https://flaterco.com/xtide/>.
- FORTES, CJEM - *Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos*, PhD Thesis, IST-UL, 2002.
- FORTES, CJEM.; REIS, MT; POSEIRO, P.; CAPITÃO, R; SANTOS, JA; PINHEIRO, LP; RODRIGUES, A; SABINO, A; RODRIGUES, MC; RAPOSEIRO, P; FERREIRA, JC; SILVA, C; SIMÕES, A; AZEVEDO, EB - “O Projeto HIDRALERTA. Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias”, in *Atas das 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, LNEC, Lisboa, Portugal, 2013.
- FORTES, CJEM; REIS, MT; POSEIRO, P; SANTOS, JA; CAPITÃO, R; PINHEIRO, L; SABINO, A; RODRIGUES, A; FERREIRA, JC; MARTINHO, S; RAPOSEIRO, P; SILVA, C; SIMÕES, A; AZEVEDO, EB; RODRIGUES, MC – “Desenvolvimentos recentes do HIDRALERTA. Sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias”, in *Atas das 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, 24 a 26 de junho, Lisboa, Portugal, ISSN - 978-989-705-073-2, 2014.
- FORTES, CJEM; REIS, MT; POSEIRO, P; SANTOS, JA; GARCIA, T; CAPITÃO, R; PINHEIRO, L; REIS, R; CRAVEIRO, J; LOURENÇO, I; LOPES, P; RODRIGUES, A; SABINO, A; ARAÚJO, JP; FERREIRA, JC; SILVA, SF; RAPOSEIRO, P; SIMÕES, A; AZEVEDO, EB; REIS, FV; SILVA, MC; SILVA, CP – “Ferramenta de Apoio à Gestão Costeira e Portuária: o Sistema HIDRALERTA”, in *Atas do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Aveiro, outubro, 2015.
- GARCIA, T; REIS, MT; POSEIRO, P; FORTES, CJEM; LOPES, P; LOURENÇO, I; AZEVEDO, E; RODRIGUES, MC - “Previsão e validação de galgamentos oceânicos no sistema HIDRALERTA”, in *proceedings of 13.º Congresso da Água*, 7 - 9 março, LNEC, Lisboa, ISBN 978-989-8509-15-4, 2016.
- LOPES, P; POSEIRO, P; FORTES, CJEM; REIS, MT; GARCIA, T; AZEVEDO, E; RODRIGUES, MC; RODRIGUES, A; SABINO, A – “Otimização da Arquitetura Computacional do Sistema HIDRALERTA”, in *proceedings of 13º Congresso da Água*, 7 - 9 março, LNEC, Lisboa, Portugal, 1–13pp. ISBN 978-989-8509-15-4, 2016.
- POSEIRO, P; FORTES, CJEM; REIS, MT; SANTOS, JA – “Aplicações do sistema de previsão e alerta do risco de galgamentos em zonas costeiras e portuárias: Costa da Caparica e Praia da Vitória”, in *Atas do VI SEMENGO*, Rio Grande, Brasil, 2014a.
- POSEIRO, P; GONÇALVES, AB; REIS, MT; FORTES, CJEM – “Early warning systems for coastal risk assessment associated with wave overtopping and flooding”, in *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2017.
- POSEIRO, P; SABINO, A; FORTES, CJEM; REIS, MT; RODRIGUES, A – “Aplicação do sistema HIDRALERTA de previsão e alerta de inundações: caso de estudo da Praia da Vitória”, in *proceedings of 12º Congresso da Água*, Lisboa, 5 a 8 de março de 2014, Centro de Congressos de Lisboa, 2014b.
- POSEIRO, P; SANTOS, JA; FORTES, CJEM; REIS, MT – “Avaliação do impacto económico dos galgamentos e inundações no porto da Praia da Vitória”, in *Atas do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Aveiro, Portugal, 2015.
- POSEIRO, P - *Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment*, PhD Thesis, IST-UL, 2019.
- PULLEN, T; ALLSOP, NWH; BRUCE, T; KORTENHAUS, A; SCHUTTRUMPF, H; VAN DER MEER, J - *EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual*. Kuste, 2007.

RODRIGUES, A; SABINO, A; POSEIRO, P; FORTES, CJEM; REIS, MT – “HIDRALERTA: A coastal and port risk forecast and warning platform”, in *Revista Hydro-International*, 21(2–March/April), 22-25, on-line 25-01-2017 (<https://www.hydro-nternational.com/content/article/coastal-and-port-risk-forecast-and-warning-platform>), 2017.

SABINO A, POSEIRO P, RODRIGUES A, REIS MT, FORTES CJEM, REIS R, ARAÚJO J – “Coastal Risk Forecast System”, *Journal of Geographical Systems*, 20(2), 2018, pp. 159-184.

SILVA, J - Observação Sistemática de Obras Marítimas. Caracterização física e histórica das estruturas marítimas de Portugal Continental: Costa OesteZona Centro. Figueira da Foz, Nazaré, Peniche e Ericeira. NPE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 2017 (não publicado).

SMITHERS, N - Wave overtopping and flooding in coastal and port areas: the test cases of São Roque do Pico, Quarteira, Faro and Ericeira, Rel. To-SEAlert 07/2019, 246 pp.

SWAN TEAM - Swan User Manual version 40.51, Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft university of Technology, Delft, The Netherlands, 111 p, 2006.

VAN DER MEER, JW; VAN GENT, MRA; POZUETA, B; VERHAEGHE, H; STEENDAM, GJ; MEDINA, JR – “Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures”, in *ICE Coasts, Structures & Breakwaters’05*, Thomas Telford, London, 259-268, 2005.

VAN GENT, MRA; POZUETA, B; VAN DEN BOOGAARD, HFP; MEDINA, JR – D42 Final Report on Generic Prediction Method, 33 p., CLASH WP8 Report, Delft, Holanda, 2005.

VAN GENT, MRA; VAN DEN BOOGAARD, H; POZUETA, B; MEDINA, J – “Neural network modeling of wave overtopping at coastal structures”, in *Coastal Engineering*, 586-593, 2007.

# Water Sensitive Urban Design: Gestão do Ciclo Urbano da Água para uma Cidade de Quarteira Sensível à Água

## *Water Sensitive Urban Design: Urban Water Cycle Management for a Water Sensitive City of Quarteira*

Miguel RODRIGUES<sup>1</sup>, Carla ANTUNES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Licenciado em Engenharia do Ambiente, Mestre em Ciclo Urbano da Água, Universidade do Algarve, Campus da Penha 8005-138 Faro, a38043@ualg.pt

<sup>2</sup> Professora Auxiliar, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, Ed.8 8005-139 Faro, cmantunes@ualg.pt, sócia APRH nº 1074

**RESUMO:** No atual contexto de alterações climáticas a gestão da água necessita de responder a múltiplos desafios e pressões a que os recursos hídricos e as cidades estão expostos. A maior sensibilidade por parte da sociedade em relação a estas questões requer novas abordagens relativamente a problemas existentes e futuros, impondo desafios aos utilizadores do território e do capital natural água. A tendência atual direciona o enfoque para modelos que promovam adaptação e resiliência do espaço urbano, através de estratégias integradas e sustentáveis, para que o recurso água, essencial a todos, continue a satisfazer as necessidades humanas e a promover, além do equilíbrio ambiental, o bem-estar social. A abordagem Water Sensitive Urban Design (WSUD) define a cidade como uma bacia hidrográfica, integrando a gestão do ciclo urbano da água (CUA) no processo de desenvolvimento urbano, em que as águas pluviais e residuais são elemento-chave, considerando a cidade como fonte de serviços de ecossistemas. Reconhece que o desenvolvimento urbano e o próprio ordenamento do território exercem enormes pressões, podendo alterar de forma significativa o ciclo natural da água, e que, em conjunto com a existência de infraestruturas envelhecidas, as ineficiências e vulnerabilidades dos sistemas aumentam. A introdução de técnicas WSUD na gestão do CUA pretende reduzir áreas urbanas impermeáveis, promover a retenção temporária de águas, o seu tratamento, infiltração e/ou reaproveitamento, o mais próximo possível da sua origem, minimizando os impactos do desenvolvimento urbano sob o meio natural. O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver uma estratégia que promova a transição da cidade de Quarteira (concelho de Loulé) para uma Water Sensitive City (Cidade Sensível à Água), através da definição de um plano de intervenção assente nos princípios WSUD, ou seja, num planeamento urbano sensível à água, como alternativa à abordagem tradicional de gestão urbana da água, que promova a gestão integrada e sustentável do CUA e, simultaneamente, a resiliência e adaptação da cidade face às alterações climáticas, integrando a comunidade na tomada de decisões. O plano apresentado, suportado nas melhores práticas de gestão (BMPs) no domínio da abordagem WSUD e com enfoque nas zonas críticas diagnosticadas na área de estudo, inclui medidas para controlo na origem, tratamento e promoção da infiltração, por exemplo, pavimentos permeáveis, coberturas verdes, recolha e armazenamento de águas pluviais, bacias de detenção e swales de biorretenção.

Palavras-Chave: “Water Sensitive City”; “Water Sensitive Urban Design”; Ciclo Urbano da Água; Resiliência; Melhores Práticas de Gestão; Quarteira.

**ABSTRACT:** The current climate change context poses multiple challenges and pressures to cities and water resources, to which water management needs to respond. A greater understanding of society regarding these issues requires new approaches to solve the existing problems, imposing challenges to current land and water resources users. The present trend directs the focus towards models that promote adaptation and resilience of the urban medium, through integrated and sustainable strategies, so that water resources, a cornerstone for societal development, continues to fulfil human needs, and to promote, in addition to environmental balance, social well-being. The Water Sensitive Urban Design (WSUD) approach, defines the city as a catchment, incorporating the management of the urban water cycle (UWC) in the urban development process, in which stormwater and wastewater are key elements, considering the city as a source of ecosystems services. Urban development and land-use are acknowledged as a source of enormous pressures, which can significantly alter the natural water cycle, and that, together with existing old infrastructures, increase the inefficiencies and vulnerability of the urban system. The introduction of WSUD techniques in the management of the UWC aims to reduce impervious areas, promote the temporary retention of water, its treatment and/or its reuse, as close as possible to its source, minimizing the impacts of urban development on the natural environment. The main objective of this work, is to develop a strategy that promotes the transition of the City of Quarteira (Loulé’s municipality) into a Water Sensitive City, through the development of an intervention plan based on WSUD principles, that is, on water sensitive urban planning, as an alternative to the traditional urban water management approach, which promotes the integrated and sustainable management of the UWC and, at the same time, the city’s resiliency and response to climate change, while engaging community’s participation in decision-making processes. The introduced plan, supported by best management practices (BMPs) in the WSUD domain, focuses on critical areas identified in the study area, which include source control, treatment and infiltration measures, for example, permeable pavements, green roofs, rainwater harvesting, detention basins and bio-retention swales.

Keywords: Water Sensitive City; Water Sensitive Urban Design; Urban Water Cycle; Resilience; Best Management Practices; Quarteira.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento das áreas urbanas, além da maior procura por serviços de água e respetiva pressão sobre o abastecimento e a gestão das águas residuais e pluviais, verifica-se um aumento das fontes de poluição, alterações nos padrões de uso do solo, assim como outros focos de pressão que afetam as cidades. Tradicionalmente, a gestão urbana da água assenta na implementação de sistemas de drenagem e abastecimento da água, que assegurem os serviços fundamentais: abastecimento, higiene pública e proteção contra cheias. O sucesso destas estratégias permitiu, durante o séc. XX, resolver muitos dos problemas das cidades nos países desenvolvidos relacionados com água e saúde pública. Atualmente, assiste-se a uma maior sensibilidade por parte da sociedade em relação às questões ambientais, necessitando a gestão da água no século XXI de responder a múltiplos desafios e pressões a que os recursos hídricos e as cidades estão expostos, tais como alterações climáticas, crescimento populacional, envelhecimento das infraestruturas, alterações nas prioridades sociais, políticas públicas e governança e tecnologias emergentes (Howe et al., 2012). A gestão urbana da água tem de se adaptar às condições e necessidades atuais, o que requer alterações nas abordagens e atitudes dos vários intervenientes no processo e utilizadores do recurso. A tendência atual direciona o investimento para soluções que promovam a adaptação e resiliência do espaço urbano, através de estratégias integradas, desenvolvidas e planeadas como complemento às infraestruturas centralizadas atualmente existentes, através de infraestruturas descentralizadas.

O conceito e a abordagem de Cidade Sensível à Água (CSA) surge como uma alternativa às estratégias tradicionais de gestão urbana da água, cujo principal objetivo é promover a implementação de práticas de gestão urbana de água mais sustentáveis e adaptadas à realidade da cidade, através de soluções assentes em infraestruturas verdes, planeamento urbano e políticas de governação (Wong e Brown, 2009), com medidas de controlo na origem, tratamento e infiltração de águas pluviais, e através de práticas de ordenamento do território que respondam aos desafios que a cidade enfrenta. As intervenções em espaço urbano sensíveis à água, assentes no conceito Water Sensitive Urban Design (WSUD) contemplam soluções baseadas na natureza, que são incorporadas na paisagem para desempenhar várias funções, possibilitando o planeamento e a criação de espaços urbanos ambientalmente responsáveis, onde a aplicação

de uma abordagem holística é centrada nas relações entre energia e emissões de carbono, conservação de água, proteção ambiental e biodiversidade, de forma a que seja possível dar resposta às necessidades humanas e ecológicas da cidade, tendo em conta o seu contexto climático e geográfico (Hoyer *et al.*, 2011). Ao mesmo tempo o recurso água é reconhecido pela comunidade, como um bem essencial, que deve ser valorizado e integrado nos espaços da cidade, através da criação de espaços atrativos para os seus habitantes e habitats naturais que promovam a biodiversidade, suportando assim a estrutura ecológica da cidade (Rodrigues, 2017).

Face ao exposto, é evidente a necessidade de promover estratégias de adaptação dos espaços urbanos. Neste enquadramento, desenvolveu-se o presente estudo que tem como principal objetivo a conceção de um plano estratégico de intervenção que promova a gestão integrada e sustentável do ciclo urbano da água (CUA), na cidade de Quarteira, em resposta às opções de adaptação preconizadas na Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas de Loulé (EMAAC de Loulé), para os setores relativos aos recursos hídricos, ordenamento do território e cidades. Na bacia hidrográfica que influencia a área urbana da cidade de Quarteira, com elevado nível de infraestruturação e concentração de edificações, e com base no diagnóstico efetuado, foram selecionadas intervenções assentes nas melhores práticas de gestão estruturais (BMP's) no domínio de WSUD, como alternativa à abordagem tradicional de gestão urbana da água, integrando a gestão da água na paisagem urbana nos seus vários domínios (água para consumo, águas residuais e águas pluviais), incentivando dessa forma a transição para uma CSA, assente numa visão e estratégia que promova a resiliência e a adaptação do sistema urbano face às alterações climáticas.

## 2. ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL

Ao nível institucional, no âmbito dos desafios, oportunidades e vulnerabilidades face às alterações climáticas, foi desenvolvido o Quadro Estratégico para a Política Climática (APA, 2019a), que inclui, nas vertentes de mitigação e adaptação em alterações climáticas os principais instrumentos de política nacional, dos quais se destacam o Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 e a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAAAC 2020).

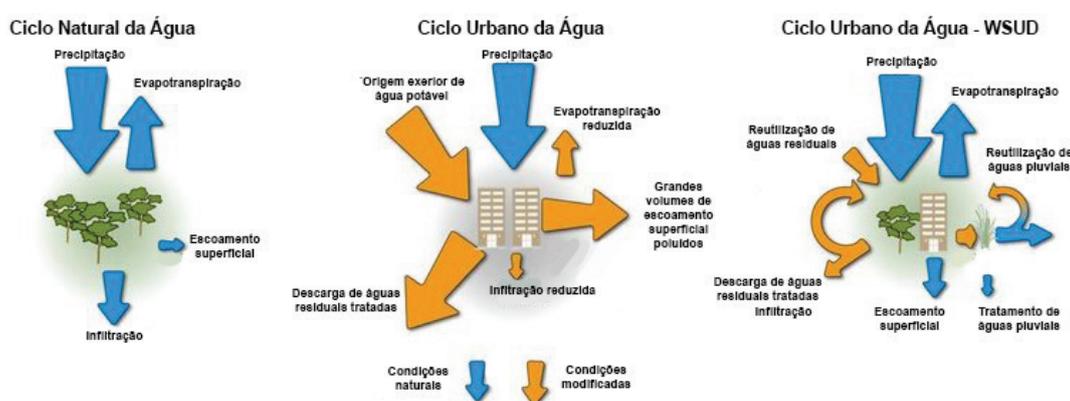
A ENAAAC 2020 estabelece os objetivos e a visão da política nacional, na qual é assumido um compromisso de adaptação aos efeitos das

alterações climáticas, através da contínua implementação de soluções baseadas no conhecimento técnico-científico e em boas práticas, refletindo os seguintes objetivos: melhoria do nível de conhecimento sobre as alterações climáticas, implementação de medidas de adaptação e promover a integração das medidas de adaptação em políticas sectoriais (APA, 2019b). De forma a promover a adaptação aos impactos previstos pelas alterações climáticas o Município de Loulé, em conformidade com a ENAAC 2020, desenvolveu a EMAAC de Loulé, assente na visão estratégica do “desenvolvimento de um município consciente, informado e capacitado na resposta às alterações climáticas, que incorpore, na ação municipal e na gestão territorial, os fatores, as ameaças e oportunidades associadas às novas dinâmicas climáticas” (CML, 2016). No levantamento das vulnerabilidades climáticas locais da EMAAC de Loulé (projeto ClimAdaPT.Local 2000-2014) foram identificados os eventos climáticos adversos e principais impactos projetados para o município (e.g., eventos de precipitação extrema e consequente ocorrência de cheias e inundações em meio urbano, eventos de seca, ondas de calor, com consequências que vão desde restrições no uso de água, alterações na biodiversidade, diminuição do volume de água disponível e, consequente diminuição da sua qualidade, com eventuais danos para a saúde humana). Outro impacto notório relativo às alterações climáticas diz respeito à erosão costeira, potenciada pela subida do nível médio do mar, com consequências transversais a quase toda a linha de costa do município, o que levanta sérias preocupações sobre o uso e ocupação da orla costeira (CML, 2016).

As projeções climáticas (IPPC, 2014) permitem antecipar um agravamento dos impactos no

município de Loulé, sobretudo os resultantes do aumento da temperatura, da maior intensidade e frequência de secas, da subida do nível do mar, de episódios de precipitação intensa em curtos períodos e do aumento da temperatura. A vulnerabilidade da cidade de Quarteira é facilmente identificada quando analisadas as consequências dos principais impactos associados aos eventos climáticos projetados.

No atual quadro de alterações climáticas promover ações focadas na adaptação e resiliência nos domínios do ordenamento e gestão do território, com enfoque na gestão urbana da água, em especial em áreas urbanas suscetíveis aos efeitos projetados é fundamental, situação particular para a cidade de Quarteira, pois localiza-se num território vulnerável. A transição para uma CSA pode, através de uma gestão integrada da água adaptada às condições locais, que incorpore decisões políticas, investimento social e institucional, avanços tecnológicos e atitudes e responsabilidades individuais, diversificar e flexibilizar o leque de origens de água disponíveis, incorporando técnicas no domínio de WSUD que mitiguem os efeitos de inundações e secas, protejam ecossistemas sensíveis, melhorem o microclima urbano, fomentem a biodiversidade, reduzam a pegada de carbono dos serviços associados à água, e capacitem agentes sociais e institucionais para uma gestão sustentável do CUA. Esta mudança depende de vários fatores, como o contexto local e as características da cidade enquanto sistema, o que implica que seja efetuada uma análise ao estado atual do modelo de gestão da água em vigor na cidade, para que sejam definidos objetivos de sustentabilidade a curto e longo prazo, inerentes a reduções no consumo de água, origens alternativas de água e sistemas de tratamento de águas pluviais (Wong e Brown, 2009).



**Figura 1.** Ciclo natural da água, CUA e CUA sob o domínio WSUD (adaptado de Hoban e Wong, 2006).

Na Figura 1 apresenta-se de forma esquemática a comparação do ciclo natural da água, do CUA e do CUA sob o domínio WSUD.

Na estratégia no domínio de WSUD que incorpora a gestão do ciclo urbano da água é fundamental que sejam adotadas e integradas as melhores práticas de gestão (BMP's), que contemplam medidas estruturais e medidas não-estruturais.

As medidas estruturais dizem respeito às estruturas urbanas implementados para gerir a qualidade e quantidade do escoamento superficial, controlar, tratar ou prevenir a poluição de águas pluviais e/ou reduzir o volume de escoamento superficial, através de infraestruturas naturais incorporadas na paisagem urbana, aplicadas numa cadeia de gestão ao longo da bacia hidrográfica, permitindo também a criação e melhoria de espaços públicos de recreio e lazer. Os elementos de controlo estrutural podem ser classificados quanto à sua localização na bacia hidrográfica que domina a cidade, função, etapa de tratamento ao longo da cadeia de gestão (primário, secundário ou terciário) e tipo de elemento estrutural (infraestruturas cinzentas ou verdes). Devem ser instalados na origem do escoamento superficial, ou proximidades, de forma a proteger os meios recetores, como aquíferos, linhas de água e zonas húmidas (Department of Environment e Swan River Trust, 2005; Rodrigues, 2017).

Os elementos estruturais associados às BMP's são agrupados nas seguintes tipologias (Hoban, South East Queensland Healthy Waterways, 2009; Townscille City Council, 2011): controlo na origem, em que se procura diminuir o volume de água afluente aos sistemas de drenagem; tratamentos primário, secundário e terciário e medidas de infiltração. Ao nível do controlo na origem destacam-se os elementos que permitem a recolha nas coberturas de edificações e o armazenamento das águas pluviais, coberturas verdes, pavimentos permeáveis, tanques e bacias de detenção. Nas técnicas de tratamento primário referem-se os dispositivos de recolha de material sólido e as bacias de sedimentação; nas técnicas de tratamento secundário além das faixas filtrantes, há os swales e os filtros de areia e; nas técnicas de tratamento terciário evidenciam-se os sistemas de biorretenção (e. g., jardins chuva, *swales* e bacias de biorretenção) e a criação de zonas húmidas artificiais. Nas medidas de infiltração além dos sistemas de infiltração (poços de infiltração, trincheiras, valas e bacias de infiltração) refere-se a recarga e armazenamento artificial de aquíferos. Os elementos estruturais podem ser dimensionados para novas áreas urbanas, mas também podem ser introduzidas em áreas já existentes. Estes

elementos devem ser usados em conjunto com melhores práticas não estruturais, para se obter uma combinação equilibrada de medidas de gestão de águas urbanas.

As medidas não-estruturais não envolvem infraestruturas fixas e permanentes e são normalmente implementadas através de mudanças de comportamento, por meio de práticas de governação municipal (políticas ambientais e de ordenamento e planeamento do território), que promovem a sensibilização e aumento de literacia por parte dos utilizadores sobre a importância de melhores práticas, as quais contribuem para um uso eficiente do recurso água, previnem a contaminação das águas pluviais e necessidade de tratamento (Department of Environment e Swan River Trust, 2005; Wong *et al.*, 2002).

A estratégia WSUD promove a gestão de águas pluviais no meio urbano, em termos de quantidade e de qualidade. No que respeita à quantidade as melhores práticas identificadas permitem, em conjunto, reduzir o escoamento superficial, a descarga controlada de água nos meios recetores e, conseqüentemente, os caudais de cheia e o risco de inundação. As intervenções que integram esta estratégia, além de contribuírem para a mitigação dos efeitos causados por eventos de precipitação na qualidade e quantidade das águas pluviais que atingem as áreas urbanas, também podem promover a manutenção e criação de habitats naturais, aumentando a biodiversidade local. A sua implementação em áreas urbanas contribui para a criação de espaços agradáveis, que incentivam o estabelecimento de vínculos afetivo-culturais entre pessoas, água e natureza, contribuindo para o seu bem-estar e para a melhoria do valor ambiental, económico e social das áreas adjacentes. Isto por sua vez contribui para educação da comunidade ao se demonstrar os benefícios e vantagens de uma cidade desenhada em prol da sensibilidade à água, mais resiliente aos impactos das alterações climáticas e equipada com infraestruturas ambientalmente mais sustentáveis (Sharma *et al.*, 2019).

Como refere Ashley *et al.* (2010), as cidades são sistemas complexos, nas quais o grande desafio se traduz na implementação de uma estratégia de gestão urbana sustentável de água, que incorpore as necessidades locais, oportunidades e que considere as barreiras físicas, políticas e socioeconómicas de uma área urbana pré-existente. Além do mais, a natureza fragmentada dos sistemas descentralizados de controlo na origem exige um maior compromisso por parte dos principais atores envolvidos na gestão urbana

da água, assim como uma maior participação da comunidade. Os benefícios associados a estas práticas são reconhecidos embora ainda existam algumas limitações, nomeadamente os custos de manutenção a longo prazo.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia que serviu de base para a elaboração do estudo está dividida em quatro eixos principais (Figura 2), incidindo em: i) revisão bibliográfica; ii) caracterização da área de estudo; iii) realização de inquéritos aos stakeholders e técnicos da Câmara; iv) diagnóstico para identificação das áreas críticas; v) definição do conceito e estratégia de intervenção e; vi) desenvolvimento da proposta de intervenção para a cidade de Quarteira.

Com base no enquadramento legal existente a nível nacional e a estratégia municipal desenvolvida de acordo com as Projeções Climáticas, Impactos e Vulnerabilidades, respetivo Perfil de Impactos Climáticos Locais, e respostas a nível municipal relativas à problemática das alterações climáticas contempladas nas Opções de Adaptação do Município de Loulé, desenvolveu-se a revisão bibliográfica que sustenta a aplicação de uma estratégia no domínio de WSUD, como estratégia de transição da cidade de Quarteira para uma Water Sensitive City.

Para efeitos de caracterização da área de estudo procedeu-se à definição da bacia hidrográfica e respetivas sub-bacias hidrográficas que dominam a Cidade de Quarteira, através da utilização da ferramenta de geoprocessamento Hydrology da plataforma ArcMap; à recolha da informação disponível, nomeadamente os Estudos de Caracterização e Diagnóstico realizados no âmbito da Revisão do PDM de Loulé (DHV, 2009a, 2009b); e aos elementos geoespaciais fornecidos pelo Município de Loulé, incidindo esta caracterização na análise e produção de cartografia dos recursos abióticos (clima, relevo, geologia, solos, recursos hídricos), bióticos e culturais (uso do solo) e nos instrumentos de gestão territorial. No âmbito da caracterização também se realizou o reconhecimento da área de intervenção, através de visitas de campo, com o intuito de validar os elementos compilados.

Com base na informação recolhida desenvolveu-se uma análise SWOT, identificando-se as principais oportunidades, vulnerabilidades, pontos fracos e pontos fortes da área em estudo, face às aptidões do território. Ainda no âmbito do diagnóstico, com base nesta análise, nos resultados obtidos nos inquéritos realizados e nos registos de eventos climáticos extremos, identificaram-se as áreas

críticas, e que são consideradas prioritárias em termos da implementação de melhores práticas no domínio WSUD.

Os inquéritos realizados, permitindo o envolvimento da comunidade no processo, contribuíram para a identificação de áreas críticas, sendo os resultados simultaneamente refletidos na seleção das estratégias de intervenção que orientam a transição da cidade de Quarteira para uma Cidade Sensível à Água.

Por último, tendo em consideração a caracterização e o diagnóstico, o conceito de intervenção e as estratégias de intervenção no domínio WSUD, estabeleceu-se o caminho de transição para uma maior sensibilidade à água, selecionando-se, face aos problemas identificados, as principais soluções de intervenção estruturais para cada sub-bacia hidrográfica da área de estudo. A localização das intervenções selecionadas, numa fase inicial com recurso ao SIG, foi posteriormente validada por trabalho de campo realizado pela equipa.

### 4. BREVE CARATERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDO

Na área em estudo o clima apresenta características Mediterrânicas, temperado com inverno chuvoso e verão seco, e com influência da proximidade do mar. A bacia hidrográfica que domina a cidade de Quarteira com uma área de cerca de 12,1 km<sup>2</sup>, localiza-se na faixa mais litoral do concelho de Loulé, correspondendo 32% da sua área total à freguesia de Quarteira. O regime de escoamento é efémero, sendo a ribeira da Vala Real da Fonte Santa, e o seu afluente, ribeira do Almargem, as principais linhas de água identificadas nesta bacia. Na Figura 3 observa-se a bacia hidrográfica e as principais sub-bacias da área de estudo, nomeadamente Almargem (7,8 km<sup>2</sup>), Cavacos (0,4 km<sup>2</sup>), Checul (1,2 km<sup>2</sup>), Forte Novo (0,5 km<sup>2</sup>), Quinta do Romão (1,8 km<sup>2</sup>), Rosa Branca (0,4 km<sup>2</sup>) e Tenazinha (0,1 km<sup>2</sup>). Relativamente ao Sistema Aquífero de Quarteira importa referir o problema associado ao fenómeno de intrusão salina.

O território em estudo caracteriza-se pelo elevado nível de infraestruturização e concentração de edificações, para fins essencialmente habitacionais e equipamentos associados, onde as cheias e inundações são um problema. Em algumas das sub-bacias referidas os aglomerados urbanos (tecido urbano contínuo) são a classe de uso do solo dominante, como se pode observar na Figura 4. A sub-bacia de Almargem, ocupa a maior área, sendo aquela em que a área de solo urbano é menor, com solo rural classificado como Reserva Agrícola Nacional, e com a maior área pertencente à Reserva Ecológica Nacional.

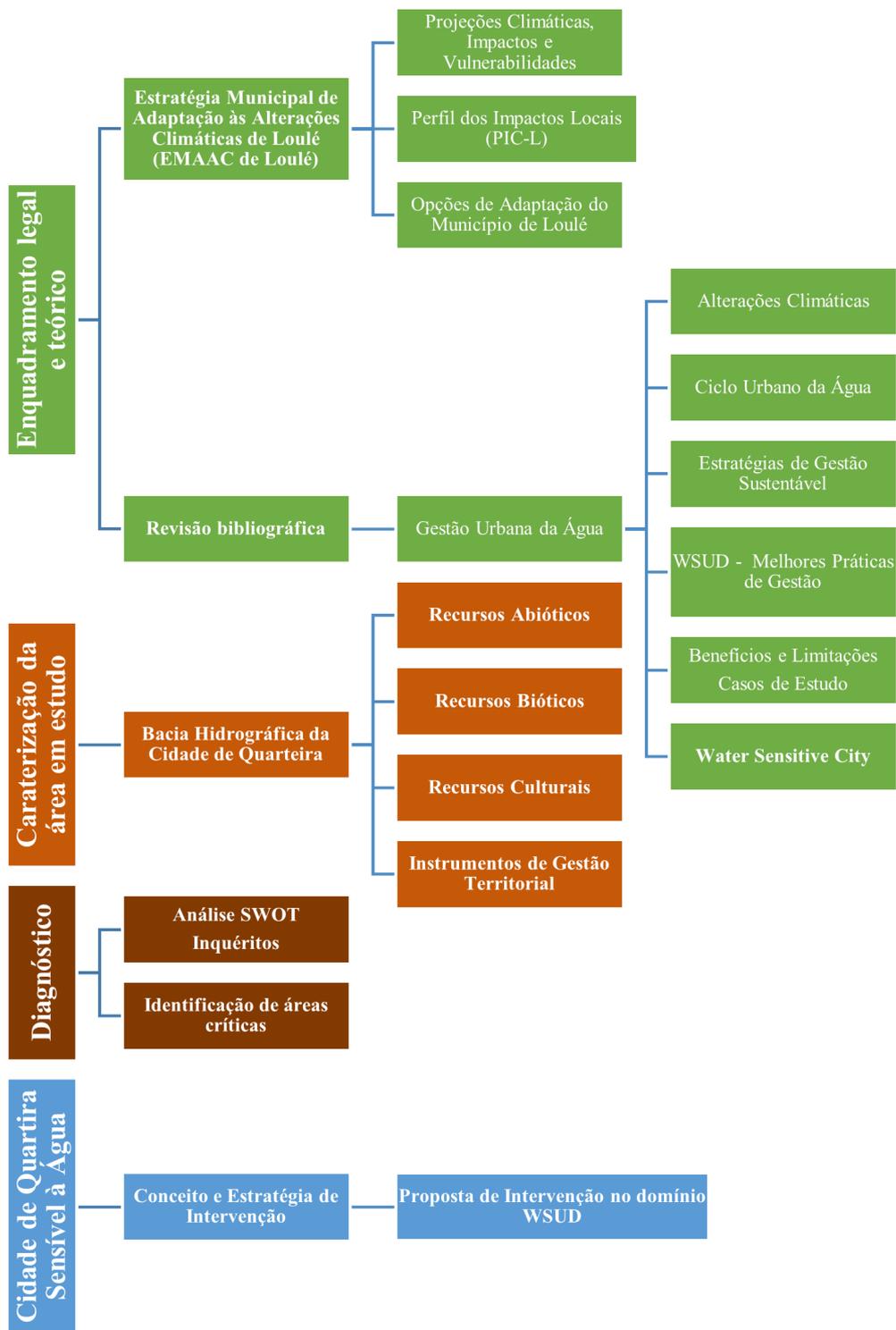


Figura 2. Metodologia.

## 5. CIDADE DE QUARTEIRA SENSÍVEL À ÁGUA

Com base nas etapas referidas e com enfoque na análise SWOT e diagnóstico a proposta desenvolvida para a cidade de Quarteira pretende, aproximar o atual modelo de gestão do CUA, o mais próximo possível daquele que caracteriza uma CSA, que assenta em três pilares: cidade como bacia hidrográfica, cidade como fonte de serviços

de ecossistemas e cidade composta por uma comunidade sensível ao CUA (Wong e Brown, 2009). Considera-se que a participação e sensibilização da comunidade na tomada de decisões é fundamental para o sucesso da proposta de tornar a cidade de Quarteira numa CSA, através de intervenções no domínio WSUD, transversais a toda a cidade. Neste processo, para se conhecer a receptividade da população às práticas propostas estavam previstas



Figura 3. Bacia hidrográfica e sub-bacias - cidade de Quarteira.

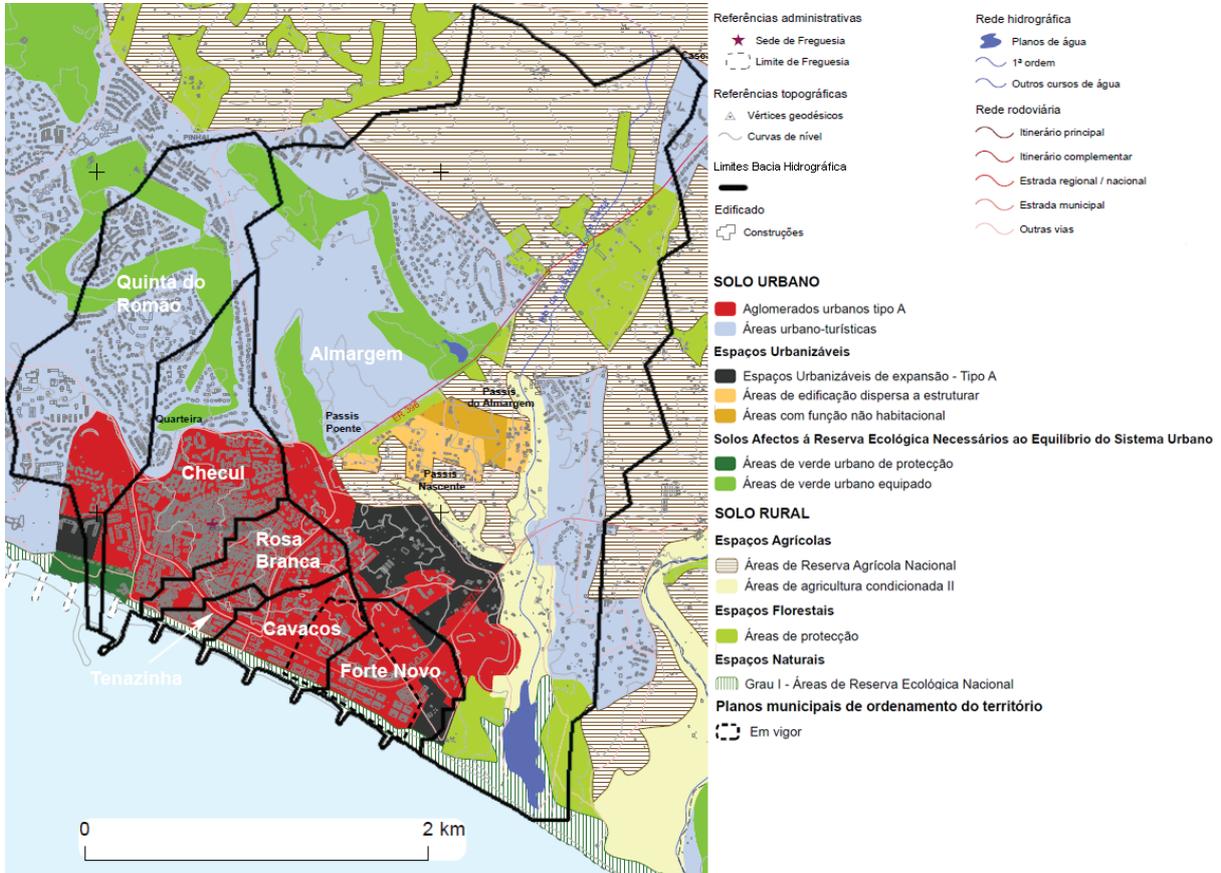


Figura 4. Planta de Ordenamento da revisão do Plano Diretor Municipal de Loulé (Fonte: adaptado de Batista e Rocha, 2009).

ações participativas, tendo em vista a definição de uma visão conjunta da futura cidade.

No plano estratégico de gestão desenvolvido para a cidade de Quarteira, entre as intervenções propostas destacam-se as seguintes tipologias: dispositivos de recolha de material sólido, pavimentos permeáveis, coberturas verdes, recolha e armazenamento de águas pluviais, bacias de retenção/detenção, canteiros arborizados, swales de biorretenção. Nas Figuras 5 a 8 apresentam-se as intervenções previstas para algumas das sub-bacias abrangidas pelo plano, assim como a respetiva localização, salientando-se desde já que a maioria das intervenções se localiza nas áreas urbanas das respetivas sub-bacias. Os exemplos selecionados para ilustrar o caso de estudo referem-se à sub-bacia hidrográfica Almargem, por ser a que ocupa a maior área, destacando-se a presença de duas linhas de água, o sistema lagunar com elevado valor ecológico e espaços urbanizáveis de expansão; e as sub-bacias hidrográficas Checul, Forte Novo e Rosa Branca, em solo urbano caracterizado por um elevado grau de impermeabilização, onde se

identificaram as zonas mais críticas e, por isso, mais vulneráveis.

Como se pode observar na Figura 5 para a sub-bacia hidrográfica Almargem são propostas intervenções em 20 locais (A1 a A20). No Quadro 1 indicam-se, de forma resumida, as intervenções preconizadas para cada local.

Como se pode observar na Figura 6 para a sub-bacia hidrográfica Checul são propostas intervenções em 19 locais (C1 a C19). No Quadro 2 indicam-se, de forma resumida, as intervenções preconizadas para cada local.

Como se pode observar na Figura 7 para a sub-bacia hidrográfica Forte Novo são propostas intervenções em 17 locais (F1 a F17). No Quadro 3 indicam-se, de forma resumida, as intervenções preconizadas para cada local.

Como se pode observar na Figura 8 para a sub-bacia hidrográfica Rosa Branca são propostas intervenções em 10 locais (RB1 a RB10). No Quadro 4 indicam-se, de forma resumida, as intervenções preconizadas para cada local.

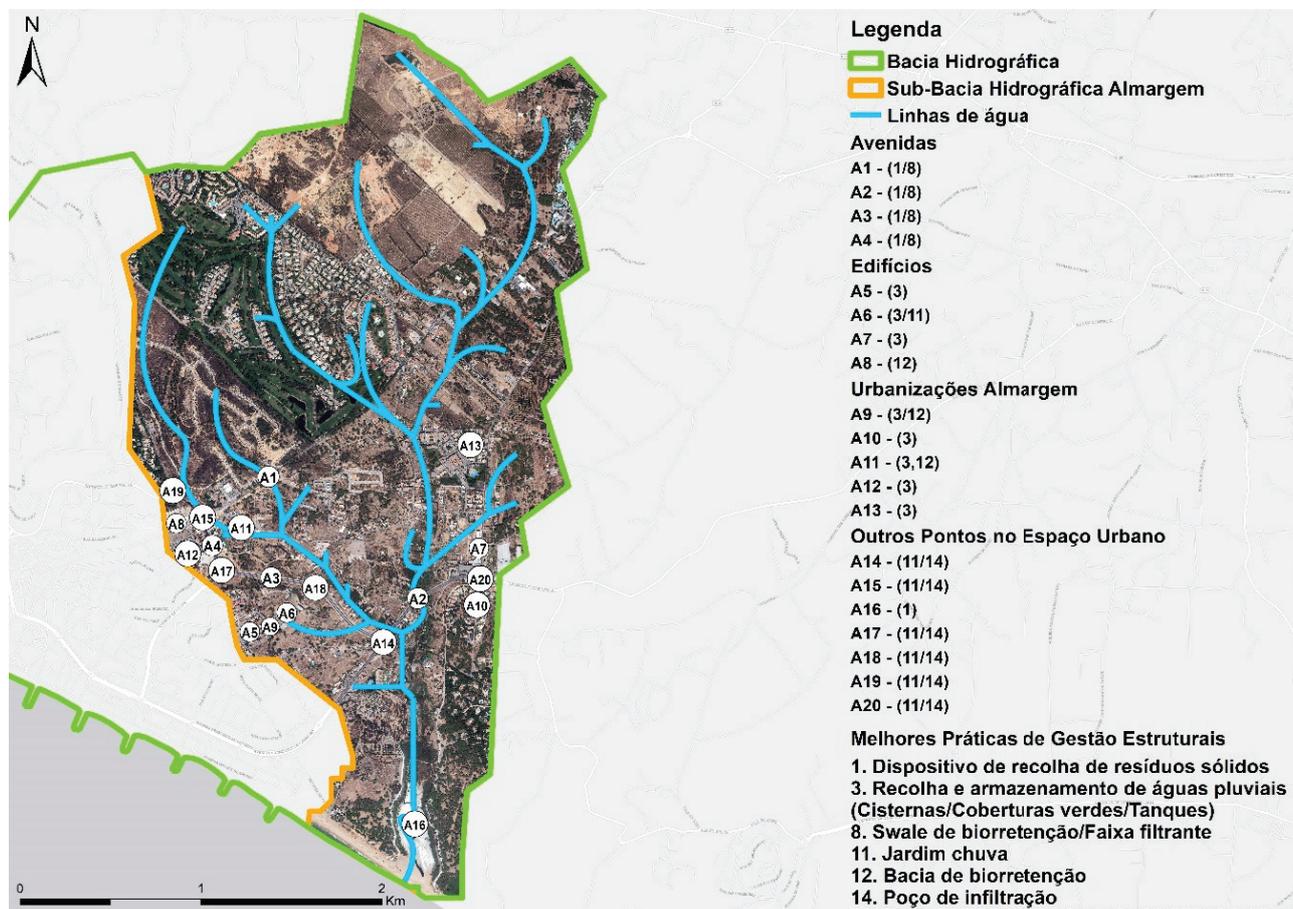
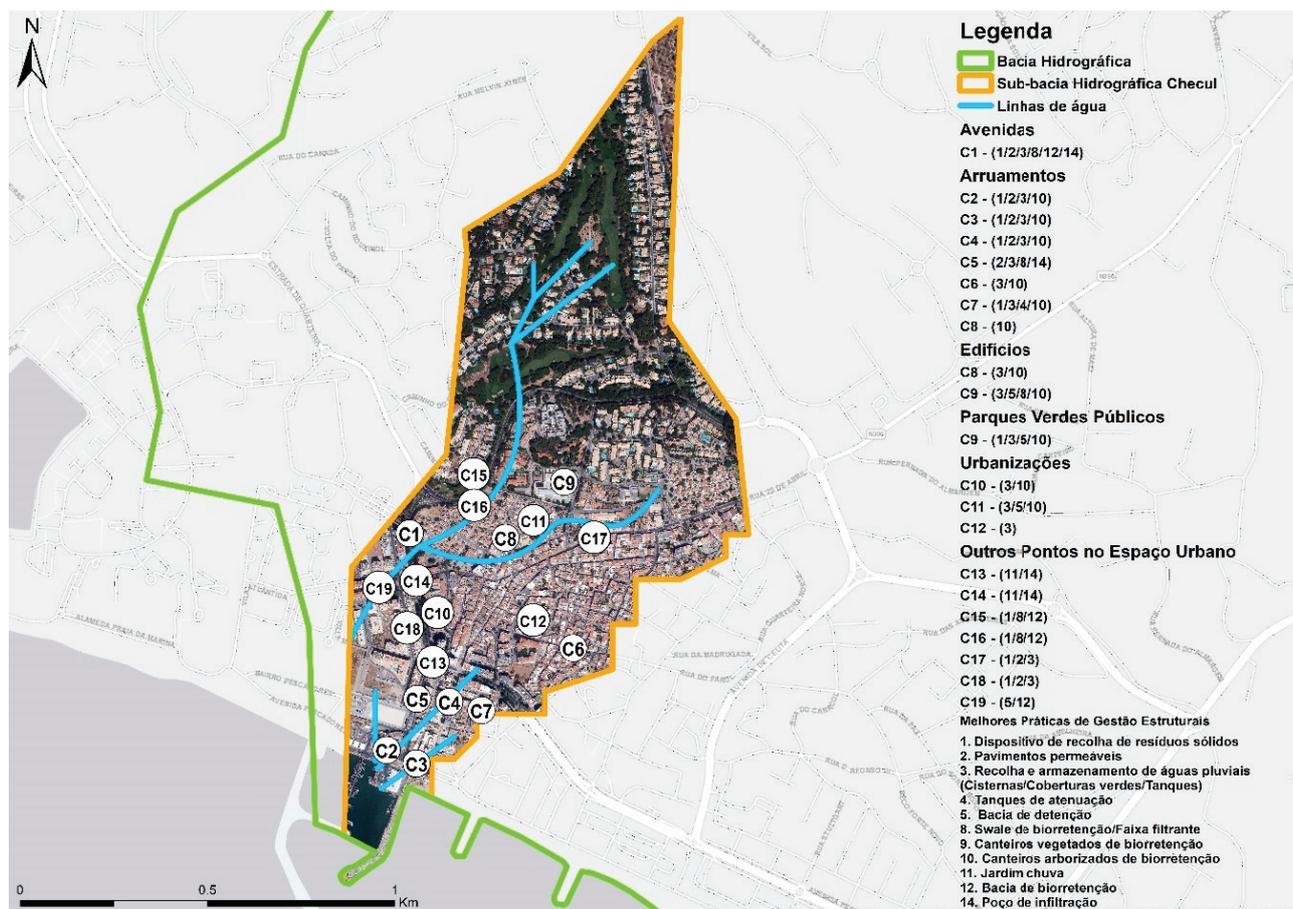


Figura 5. Intervenções na sub-bacia hidrográfica Almargem.

**Tabela 1.** Resumo das intervenções, por local, sub-bacia hidrográfica Almargem

Identificação do local	Descrição das intervenções
A1; A2; A3; A4	Separador central (Av. do Atlântico, Francisco Sá Carneiro, Papa Francisco e Ceuta): adaptado com <i>swale</i> de biorretenção. Rotundas: colocação de dispositivo de recolha de resíduos sólidos nos sumidouros existentes, para diminuir os sólidos suspensos totais (SST).
A5; A7; A10; A12; A13	Edifícios e Urbanizações: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo. Água recolhida pode ser utilizada para rega, lavagem de equipamentos, piscinas.
A6	Escola EB1 n.º 3 de Quarteira: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo; Espaços verdes existentes: jardins chuva com componente de educação e sensibilização dos alunos, corpo docente e funcionários.
A8	Espaços verdes adjacentes ao Cemitério: bacia de biorretenção, recebe o escoamento com origem no estacionamento e armazém.
A11; A9	Condomínio Garden Golf: coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo (traseiras do edifício). Rua da Pernada: bacia de biorretenção no canteiro localizado no troço inicial da rua. Urbanização da Abelheira: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo. Espaço verde adjacente aos prédios: bacia de biorretenção.
A14; A15; A17; A18; A19; A20	Rotundas: jardim chuva; poço de infiltração, que recolhe o escoamento superficial e o efluente tratado dos sistemas localizados a montante.
A16	Foz do Almargem: monitorização; nos pontos de descarga na lagoa - dispositivo de recolha de resíduos sólidos.



**Figura 6.** Intervenções na sub-bacia hidrográfica Checul.

**Tabela 2.** Resumo das intervenções, por local, sub-bacia hidrográfica Checul.

Identificação do local	Descrição das intervenções
C1	Troço inicial Av. Carlos Mota Pinto: bacia de biorretenção; nos separadores laterais e central – <i>swale</i> de biorretenção; dispositivos de recolha de resíduos sólidos e pavimentos permeáveis nos sumidouros e pontos de passagem.
C2; C3	Largo do Mercado (complementar a RB1) e Largo das Cortes Reais; dispositivo de recolha de resíduos sólidos em sumidouros existentes; reabilitação dos canteiros arborizados, junto às zonas de estacionamento, com funções de biorretenção. Edifícios: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo.
C4	Rua Vasco da Gama: dispositivos de recolha de resíduos sólidos e pavimentos permeáveis nos sumidouros e pontos de passagem localizados na intersecção com a Av. Dr. Carlos Mota Pinto, Rua D. João V/Rua Hermenegildo Piedade e Rua Gago Coutinho. Edifícios: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo. Dotar canteiros arborizados com funções de biorretenção.
C5	Rua da Alagoa: dispositivo de recolha de resíduos sólidos nos sumidouros marginais à rua; pavimentos permeáveis no estacionamento no troço inicial da rua e nos pontos de passagem; faixa filtrante no separador central; bacia de biorretenção: troço terminal do separador. Edifícios: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo.
C6	Rua Patrão Lopes: coberturas dos edifícios e espaço verde recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo; dotar canteiros existentes com funções de biorretenção.
C7	Edifícios adjacentes ao Largo Poeta Pardal: coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo; canteiros arborizados com funções de biorretenção.
C8; C10	Sede da Checul: importante ponto na área de intervenção, pode funcionar como polo de sensibilização e educação no que toca à transição para a CSA. Edifícios: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo. Dotar canteiros arborizados com funções de biorretenção. Bairro IGAPHE e Miravila: nas coberturas recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo; Canteiros arborizados melhorados com funções de biorretenção.
C9	Escola EB1/JI D. Francisca de Aragão: canteiros arborizados de biorretenção; coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo; campo de recreio: bacia de detenção. Estacionamento lateral na Rua da Escola: pavimentos permeáveis nos pontos de passagem; faixa separadora adaptada para incluir <i>swale</i> de biorretenção.
C11	Bairro da Checul: edifícios - recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo; campo de recreio (~350 m <sup>2</sup> ): bacia de detenção seca; SW do bairro – canteiros melhorados com funções de biorretenção.
C12	Urbanização do Ribeirinho: coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo.
C13; C14	Rotundas da Checul e do Polvo: jardim chuva; poço de infiltração, que recolhe o escoamento superficial e recebe o efluente tratado dos sistemas localizados a montante.
C15; C16	Áreas verdes marginais à Estrada de Quarteira: dispositivo de recolha de resíduos sólidos; <i>swale</i> de biorretenção; bacia de biorretenção.
C17; C18	Ruas 25 de Abril e D. Dinis: dispositivo de recolha de resíduos sólidos e pavimentos permeáveis nos sumidouros existentes e pontos de passagem; nas coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo.
C19	Largo Dr. Diamantino Duarte Baltazar (espaço central ~550 m <sup>2</sup> ): bacia de detenção seca; nos espaços verdes arborizados - bacias de biorretenção.

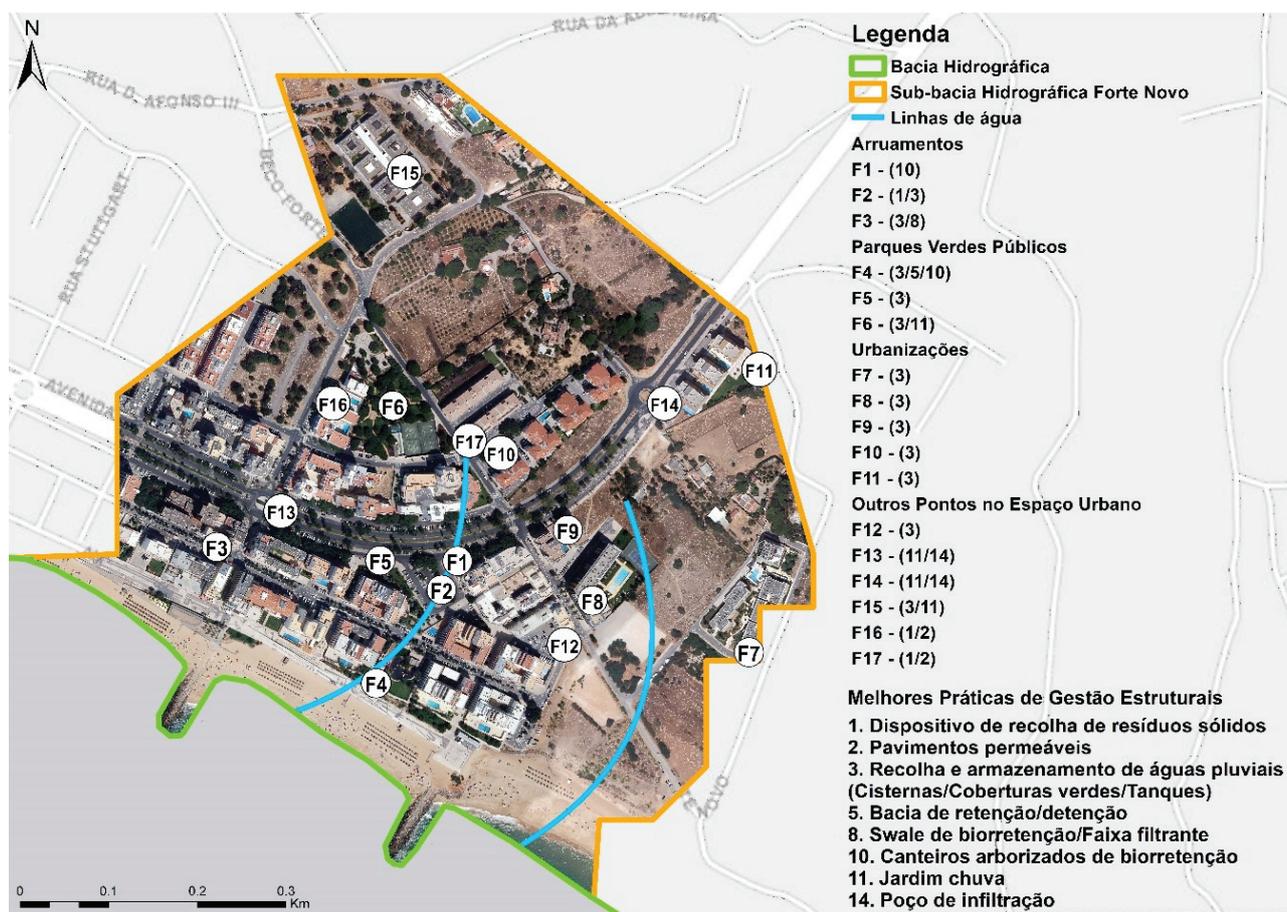


Figura 7. Intervenções na sub-bacia hidrográfica Forte Novo.

Tabela 3. Resumo das intervenções, por local, sub-bacia hidrográfica Forte Novo.

Identificação do local	Descrição das intervenções
F1	Junto ao Café Golfinho: canteiro adaptado com funções de biorretenção, para receber escoamento superficial com origem no estacionamento.
F2	Parque de Estacionamento: dispositivo de recolha de resíduos sólidos nos sumidouros. Nas coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento em tanques ou cisternas.
F3	Ruas do Nascente e Leste: adaptação do separador central, colocação de swale de biorretenção; nas coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento em tanques ou cisternas.
F4	Jardim: coberturas dos edifícios adjacentes recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo; espaço de recreio - bacia de retenção; canteiros arborizados de biorretenção.
F5; F7; F8; F9; F10; F11; F12	Parque Verde Público e Urbanizações: nas coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento em tanques ou cisternas.
F6; F15	Jardim Público de São Pedro do Mar: jardim chuva; dispositivo de recolha de resíduos sólidos.
F13; F14	Rotundas: jardim chuva; poço de infiltração, recebe o efluente tratado dos sistemas localizados a montante.
F16; F17	Ruas José Afonso e Forte Novo: dispositivo de recolha de resíduos sólidos e pavimentos permeáveis, nos pontos de passagem no troço final das ruas.



**Figura 8.** Intervenções na sub-bacia hidrográfica Rosa Branca.

**Tabela 4.** Resumo das intervenções, por local, sub-bacia hidrográfica Rosa Branca.

Identificação do local	Descrição das intervenções
RB1	Dispositivo de recolha de resíduos sólidos nos sumidouros existentes; recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo.
RB2	Largo dos Rosas: nas coberturas dos edifícios adjacentes recolha de águas pluviais e armazenamento em tanques; no largo - tanque de atenuação.
RB3; RB7	Dispositivo de recolha de resíduos sólidos em sumidouros existentes nas intersecções com Travessa da Alegria, Rua Afonso III e Rua do Farol e do Ribeiro; pavimentos permeáveis na área de estacionamento (RB3) e ponto de passagem na intersecção com a Rua do Pinheiro; nas coberturas dos edifícios adjacentes recolha de águas pluviais e armazenamento no solo.
RB4	Espaço verde entre as Ruas Srg. Arlindo Viegas e dos Forninhos: introdução de espécies autóctones; tanques de atenuação; canteiros arborizados melhorados com funções de biorretenção.
RB5	Avenida de Ceuta: nas intersecções com as Ruas Afonso III e da Abelheira - dispositivo de recolha de resíduos sólidos nos sumidouros existentes; pavimentos permeáveis nos pontos de passagem nessas mesmas intersecções e final da avenida; coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo.
RB6	Praceta da Madrugada: tanque de atenuação; canteiro arborizado melhorado com funções de biorretenção.
RB8; RB9	Ruas Marco do Fontanário e Gonçalo Velho: pavimentos permeáveis nas áreas onde há intersecção com outras ruas; coberturas dos edifícios recolha de águas pluviais e armazenamento ao nível do solo.
RB10	Rotunda da <i>Phonehouse</i> : jardim chuva; poço de infiltração, que recolhe o escoamento superficial e recebe o efluente tratado dos sistemas localizados a montante.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento e implementação de uma Cidade Sensível à Água é o resultado de interações complexas entre os principais atores chave e as características locais. A aceitação e colaboração da comunidade e o apoio político são fundamentais para efetivar esta transição, nomeadamente em ambientes urbanos complexos, como é o caso da cidade Quarteira. É necessária uma atitude proativa em relação a este novo paradigma de gestão urbana da água, o que torna o desafio tão social quanto tecnológico.

O plano apresentado, suportado por melhores práticas de gestão no domínio da WSUD e com enfoque nas zonas críticas diagnosticadas na área de estudo, suporta a transição de Quarteira para uma CSA. As medidas estruturais e de planeamento urbano associadas a técnicas convencionais de drenagem de água na cidade podem contribuir para melhorar a capacidade de adaptação a riscos urbanos inerentes à gestão do CUA, pois promovem a gestão holística da água, o que inclui a sua utilização, armazenamento, tratamento e reutilização, de forma a maximizar o valor ambiental, cultural, recreacional e económico do recurso água.

Salienta-se que este plano, de carácter preliminar, carece de ajustes e de programação faseada na respetiva implementação. O processo de tornar uma CSA é evolutivo, e para que muitas destas tipologias de intervenção sejam integradas no (re)desenho da paisagem urbana é fundamental a participação e colaboração de uma equipa pluridisciplinar, a validação por parte dos agentes locais e a monitorização dos sistemas. As funções tradicionais da paisagem urbana necessitam de ser reforçadas com uma maior compreensão das funções ecológicas da paisagem urbana, que integram os objetivos da gestão sustentável do ciclo urbano da água.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Unidade Operacional de Adaptação às Alterações Climáticas - Direção Municipal de Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara Municipal de Loulé pelo apoio e disponibilização de informação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA (2019a). Quadro Estratégico para a Política Climática. Disponível em <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=1181>. Acesso 20 janeiro 2020.

APA (2019b). Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas 2020. Disponível em <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=118&sub3ref=955>. Acesso 9 janeiro 2020.

Ashley, R. M., Faram, M. G., Chatfield, P. R., Gersonius, B., Andoh, R. Y. G. (2010). Appropriate Drainage Systems for a Changing Climate in the Water Sensitive City. *Low Impact Development 2010*, 864–877. [https://doi.org/10.1061/41099\(367\)76](https://doi.org/10.1061/41099(367)76)

Batista, H., Rocha, R. (2009). *Carta VII.5 - Planta de Ordenamento do PDM em vigor*. DHV, SA.

CML (2016). Loulé: Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas. Disponível em <http://www.louleadapta.pt/recursos>. Acesso 7 janeiro de 2020.

Department of Environment, Swan River Trust (2005). *Stormwater Management Manual for Western Australia*.

DHV (2009a). Estudos de Caracterização e Diagnóstico no Âmbito da Revisão do PDM de Loulé - Volume II - Análise Biofísica. Câmara Municipal de Loulé.

DHV (2009b). Fichas de Diagnóstico dos Estudos de Caracterização e Diagnóstico no Âmbito da Revisão do PDM de Loulé. . Câmara Municipal de Loulé.

Hoban A, Wong THF. (2006). WSUD resilience to Climate Change. 1st International Hydropolis Conference. Perth, WA. Australia.

Hoban, A., South East Queensland Healthy Waterways (2009). *Concept design guidelines for water sensitive urban design*. Brisbane: SEQ Healthy Waterways Partnership.

Hoyer J., Dickhaut W., Kronawitter L, Weber B. (2011). *Water Sensitive Urban Design*. JOVIS Verlag GmbH.

Howe C., Butterworth J., Smout I., Duffy AM., Vairavamoorthy K. (2012). Sustainable Water Management in the City of the Future: Findings from the SWITCH Project 2006-2011. Disponível em <https://www.ircwash.org/resources/sustainable-water-management-city-future-findings-switch-project-2006-2011>. Acesso 30 novembro 2019.

IPCC (2014). Climate change 2014. Synthesis report. Versión inglés. In *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

Rodrigues, J. E. G. (2017). *Water Sensitive Cities: A vision for Lisbon's Alcântara watershed*. Universidade de Lisboa.

Sharma, A. K., Gardner, T., Begbie, D. (2019). *Approaches to Water Sensitive Urban Design*. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03594-5>

Wong, T. H. F., Chesterfield, C. J., Lloyd, S. D. (2002). *Water Sensitive Urban Design – A Stormwater Management Perspective*. Victoria.

Wong T. H. F., Brown R. (2009). The water sensitive city: Principles for practice. *Water Science and Technology*, 60(3), 673–682. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.436>

# Análise de eventos de risco através de modelação numérica XBeach. Caso de Estudo – Costa da Caparica

## *Risk events analysis by XBeach numerical modeling. Case study – Costa da Caparica*

Andreia Marques FERREIRA<sup>1</sup>, Conceição J.E.M. FORTES<sup>1</sup>, Maria Teresa REIS<sup>1</sup>, Juan L. GARZON<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, [aferreira@lnec.pt](mailto:aferreira@lnec.pt), [jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt), [treis@lnec.pt](mailto:treis@lnec.pt)

<sup>2</sup> CIMA/FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, [jlhervas@ualg.pt](mailto:jlhervas@ualg.pt)

**RESUMO:** É cada vez mais usual o recurso à modelação numérica para a simulação de eventos de galgamento, inundação e erosão em zonas costeiras. Neste estudo, recorre-se ao acoplamento de dois modelos, SWAN + XBeach (modo *surf beat*), para a propagação da agitação marítima do largo até à zona de espraio e para reproduzir a evolução morfodinâmica, a fim de avaliar a ocorrência de galgamento e erosão resultantes de eventos meteo-oceanográficos extremos. O local de estudo incide sobre o sector urbano artificializado da Costa da Caparica, que é composto por um campo de esporões e uma estrutura de proteção aderente em toda a extensão, formando seis células de praia arenosa. As simulações cobriram 96 h de forçamentos oceanográficos, representando, assim, a passagem da tempestade Hércules/Christine, entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014. O modelo SWAN propagou com sucesso as condições de agitação marítima para a área de estudo, quando comparado com os dados registados pela boia do Porto de Lisboa. Em relação ao modelo XBeach, este foi capaz de reproduzir alguma da evolução morfodinâmica espectacular, contudo a erosão da praia emersa ficou aquém dos relatos documentados, não tendo sido possível avaliar quantitativamente os resultados. O alcance máximo do espraio obtido ao longo deste troço de costa foi inferior ao documentado, o que induz a falhas na previsão de inundações devido ao galgamento. Estes resultados podem ser devidos a uma parametrização inadequada do modelo e/ou à falta de levantamentos topo-batimétricos da praia. Esta abordagem metodológica representa um passo importante para uma melhor estimativa da evolução morfodinâmica na Costa da Caparica devido a eventos de tempestade e significa um importante esforço inicial para melhorar a avaliação dos eventos de galgamento e inundação.

Palavras-Chave: Riscos costeiros; Galgamento; Inundação; Erosão; Espraio; Tempestade marítima

**ABSTRACT:** The use of numerical modelling to simulate coastal hazards is increasing in popularity. In this study, a multimodel framework, SWAN + XBeach (*surf beat* mode), is used to propagate waves from offshore to the shoreline and reproduce morphodynamic changes in extreme events, to assess overtopping and erosion hazards in Costa da Caparica. The study site is an artificialized coastal sector with rocky groynes forming six sandy beach cells and a seawall at the backside. The simulations covered 96 hours representing the impact of Hércules/Christine storm between January 3 and 7, 2014, in the study area. SWAN model successfully propagated the wave conditions from offshore to the study area when compared against the nearby Port of Lisbon buoy data. Regarding the XBeach model, it was able to reproduce some of the expected morphological evolution, however the beach erosion did not fully correspond to the reported descriptions. The model clearly underestimated the run-up, which induces to deficiency of flood forecasting due to overtopping. These results can be the consequence of an inappropriate model parameterization and/or the lack of available beach topobathymetric historic data. This framework represents an important step to achieve a better estimation of the morphodynamic evolution in Costa da Caparica due to storm events and signifies an initial effort to improve the assessment of the overtopping and flood events.

Keywords: Coastal Risks; Overtopping; Flood; Erosion; Run-up; Storms

## 1. INTRODUÇÃO

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto EW-Coast – *Early warning system for coastal risks induced by storms*. O projeto pretende desenvolver, testar e validar um sistema de previsão e alerta para eventos de risco de galgamento, inundação e erosão em zonas costeiras, com base numa rede bayesiana (Poelhekke *et al.*, 2016). O sistema será aplicado a 3 casos de estudo (Praias da Quarteira, de Faro e da Costa da Caparica) e avaliará os potenciais impactos para cada local de estudo (EW-Coast, 2019).

Comumente, as análises e a previsão de risco no domínio costeiro baseiam-se em formulações empíricas, tanto para o galgamento e inundação como para a análise da erosão, podendo inclusive recorrer-se a indicadores (geoindicadores), como é o caso da análise de evolução de praias de areia (Carapuço *et al.*, 2016). Estes métodos têm a grande vantagem de se obterem resultados num curto espaço de tempo com baixo investimento. No entanto, os resultados são pouco precisos, em grande parte, devido à limitada aplicabilidade de cada formulação empírica. Com efeito, as fórmulas empíricas não contemplam a imensa diversidade de zonas costeiras e de condições de forçamento dos sistemas, pelo que os modelos numéricos constituem uma alternativa viável, pois possuem maior capacidade de resolução para a conjugação da diversidade de *inputs*, e englobam um maior número de processos físicos. O problema da utilização destes modelos numéricos prende-se com o tempo de computação, barreira esta que tem vindo a diminuir em consequência da evolução da tecnologia, tendo permitido ampliar a sua utilização, e consequente validação, aumentando a robustez destas ferramentas. Apesar destes avanços, em grandes áreas costeiras, é comum recorrer-se ao acoplamento de modelos numéricos para a simulação dos efeitos da agitação marítima, em termos de galgamento, inundação e erosão costeira.

Neste projeto e no presente estudo, utiliza-se a acoplação de dois modelos numéricos: SWAN (Booij *et al.*, 1999) e XBeach (Roelvink *et al.*, 2009). O modelo numérico SWAN, é um modelo espectral que efetua a geração e propagação da agitação marítima em grandes áreas costeiras (não inclui processos morfodinâmicos). O modelo numérico XBeach, adequado a pequenas áreas, combina processos hidro e morfodinâmicos e respetivos impactos em praias de areia para a escala de tempo de tempestades (Roelvink *et al.*, 2009). Esta estratégia de modelação foi aplicada ao caso de estudo da Costa da Caparica, considerando como forçamento as características da agitação marítima associadas

à tempestade Hércules/Christine, que atingiu Portugal Continental de 5 a 7 de janeiro de 2014 (Santos e Mendes, 2014). Esta é uma tempestade documentada com impactos conhecidos na área de estudo, o que constitui um bom caso de estudo para avaliação dos modelos SWAN e XBeach nesta situação extrema.

Note-se que, a Costa da Caparica é umas das áreas balneares mais procuradas pelos habitantes de grandes centros urbanos, como Almada e Lisboa, entre outros, devido à proximidade a estes núcleos urbanos e às suas praias apazíveis, com um grande foco de desenvolvimento turístico assente nestas premissas. O troço costeiro em estudo, trata-se de uma zona onde se desenvolvem atividades recreativas e de lazer (*e.g.* passeios, surf, entre outras) ao longo de todos os meses do ano. No entanto, é uma zona onde a ocorrência de eventos de galgamentos é elevada, tanto na frequência como na magnitude, acompanhados de elevadas movimentações sedimentares, o que leva, nalguns casos, a que se verifiquem zonas com erosão significativa, comprometendo a prática das atividades regulares, podendo mesmo pôr em causa a integridades das estruturas de defesa existentes. A modelação da dinâmica sedimentar desta zona recorrendo a modelos numéricos, como o XBeach, constitui sem dúvida uma oportunidade e um desafio.

## 2. CASO DE ESTUDO: COSTA DA CAPARICA

A Costa da Caparica situa-se na costa oeste de Portugal continental, imediatamente a sul do estuário exterior do rio Tejo. A área de estudo abrange o setor costeiro artificializado, entre troço sul da praia de São João da Caparica e o troço norte da Nova Praia (Figura 1). Esta área apresenta uma extensão longilitoral aproximada de 2.70 km, com uma orientação predominante NNW-SSE, sendo este um troço litoral baixo e arenoso com estrutura rígida de proteção aderente em toda a extensão da área de estudo, acompanhada de um campo de esporões. Esta é uma área urbana, onde sobre a estrutura de proteção aderente estão implantados diversos apoios de praia (bares, restaurantes e escolas de surf), acessível todo o ano.

A Costa da Caparica é uma zona sensível à ocorrência de galgamento e erosão devido a eventos oceanográficos extremos, dos quais decorrem gastos avultados a fim de manter as condições balneares e proteger a linha de costa.

No âmbito do projeto EW-Coast foi elaborado um levantamento da ocorrência de erosão e/ou galgamento na zona de estudo, entre 2000 e 2019, devido a tempestades marítimas. Esta compilação de eventos teve por base relatos de jornais, relatórios

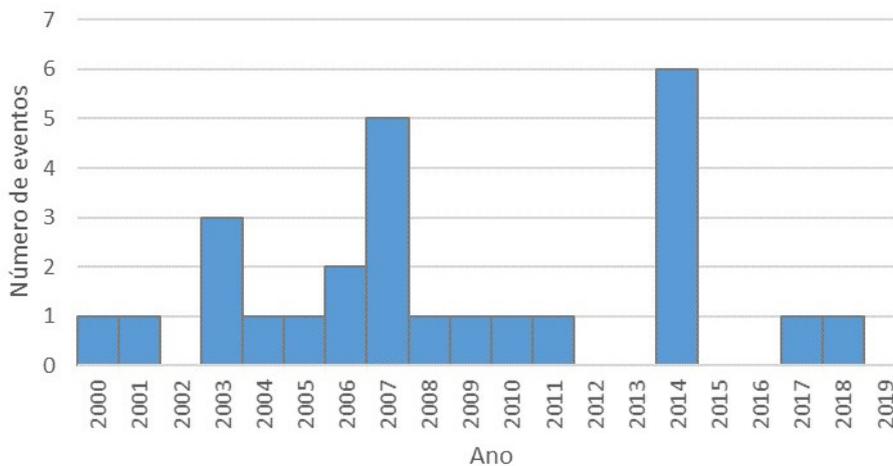
oficiais (e.g. Pinto *et al.*, 2014) e levantamentos feitos por vários autores (Jaranović, 2017; Ferreira, 2016; Heleno, 2017), tendo sido consideradas todas as tempestades em que se registaram galgamentos, inundação e/ou erosão. Deste levantamento, contabilizaram-se 26 eventos documentados, Figura 2, verificando-se a ocorrência de um, ou mais, eventos em 74% dos anos, entre 2000 e 2019. Destes, destacam-se os eventos ocorridos nos anos de 2007 e 2014, Figura 3, pelo número de eventos registados e pela intensidade dos mesmos, que se refletiu em custos na reposição das condições para as práticas balneares (Santos e Mendes, 2014).

## 2.1 Estratégia de Modelação

Neste estudo optou-se por fazer a modelação da propagação da agitação marítima através de duas ferramentas de modelação sequenciadas (SWAN + XBeach). Primeiro recorreu-se ao modelo SWAN (*Simulating WAves Nearshore*) (Booij *et al.*, 1999), para a propagação da agitação desde o largo até perto da costa. Seguindo-se o modelo XBeach (*eXtream Beach*) (Roelvink *et al.*, 2009) para 2D, em modo *surf beat*, na propagação da agitação marítima até ao limite do espraio em simultâneo com a modelação dos processos morfodinâmicos decorrentes dos forçamentos oceanográficos.



**Figura 1.** Área de estudo da Costa da Caparica, com indicação do nome das praias e representação dos perfis de análise do espraio.



**Figura 2.** Histograma de eventos de tempestade com a ocorrência de galgamento, inundação e/ou erosão documentados entre 2000 e 2019, na zona costeira da Costa da Caparica.



**Figura 3.** Exemplos de tempestades marítimas com ocorrência de galgamento na frente costeira da Costa da Caparica. À esquerda: recorte do Diário de Notícias em janeiro de 2007. À direita: fotografia publicada pelo jornal Público em janeiro de 2014.

O desempenho da modelação SWAN foi verificado através da comparação com os dados da boia ondógrafo da Administração do Porto de Lisboa localizada na região costeira em estudo, Figura 4. Para a modelação XBeach, os resultados foram confrontados com relatos históricos.

### 2.1.1 Modelação SWAN

A propagação da agitação marítima, desde águas profundas até águas pouco profundas, foi modelada recorrendo ao modelo numérico de propagação espectral SWAN.

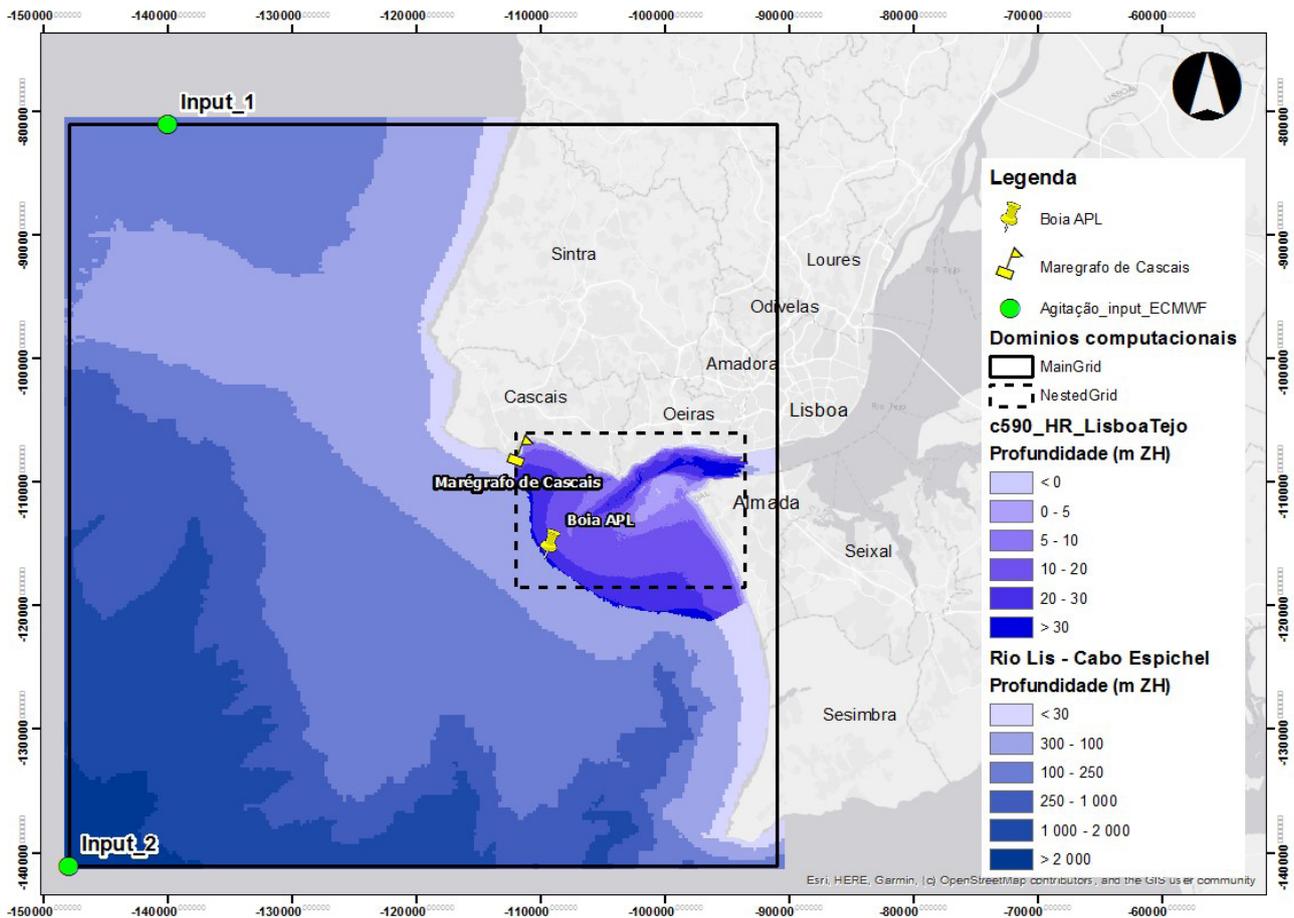
Para a aplicação deste modelo recorreu-se a dois modelos batimétricos, o modelo batimétrico do rio Lis ao cabo Espichel, com resolução de 250 m (IH, 2013), e um modelo batimétrico de alta resolução do rio Tejo (EMODnet, 2019), Figura 4, para a construção das malhas batimétricas. Foram consideradas duas grelhas computacionais, uma de carácter regional (*Main Grid*) e uma intermédia (*Nested Grid*), correspondentes a malhas encaixadas, com resolução de 500 m e 100 m, respetivamente. O regime de agitação marítima na costa oeste de Portugal continental caracteriza-se por uma predominância de noroeste (Costa et al., 2001). Contudo, no que concerne a regimes de tempestades, segundo Rogers (1997), nesta região do Atlântico ocorrem tempestades extratropicais, oriundas de noroeste em consonância com o regime predominante da agitação marítima na região, mas também se manifestam tempestades subtropicais, de sudoeste, às quais a zona de estudo se encontra mais exposta. Atendendo, por um lado às características dos regimes de tempestade e, por outro, à exposição do troço costeiro em estudo, foram consideradas duas séries de dados de agitação

ao largo: Input\_1 e Input\_2 (Figura 4), a primeira imposta na fronteira norte e a segunda imposta nas fronteiras oeste e sul, do domínio computacional regional. As séries de dados de agitação marítima, nos pontos Input\_1 e Input\_2, foram obtidas a partir do modelo global WAM (*ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

Os resultados da modelação da agitação marítima até perto da costa foram avaliados através da análise dos registos da boia ondógrafo da Administração do Porto de Lisboa, doravante designada por Boia APL, cujas coordenadas são -109279 m e -114963 m (ETRS89 Portugal TM06) e que se encontra sobre a batimétrica dos 22 m.

### 2.1.2 Modelação XBeach

Recorreu-se ao modelo XBeach para resolver a propagação da agitação marítima até ao limite do espraio, em simultâneo com a modelação dos processos morfodinâmicos decorrentes dos forçamentos oceanográficos, tal como o transporte sedimentar, a formação de escarpas ou a variação dos fundos e a sua atualização ao longo da simulação (*bed update*). Nos processos hidrodinâmicos, o modelo é capaz de resolver equações horizontais 2D acopladas para a propagação da agitação, correntes, transporte sedimentar e variação do fundo, com forçamentos variáveis no tempo, tanto para ondas (com possibilidade de forçamento espectral), como para correntes e marés (Roelvink et al., 2009). Dos processos hidrodinâmicos envolvidos, destaca-se a transformação de ondas longas (infra-gravíticas) através da sua geração, propagação e dissipação. O modelo disponibiliza um módulo, que permite incorporar a resolução das ondas curtas com menor esforço computacional, modo *surf beat*, resolvendo



**Figura 4.** Representação das malhas batimétricas e domínios computacionais utilizados na modelação SWAN. Localização dos pontos onde foram obtidos os dados de agitação ECMWF a impor ao modelo (Input\_1 e Input\_2), localização da boia ondógrafo da Administração do Porto de Lisboa (APL) e localização do marégrafo de Cascais.

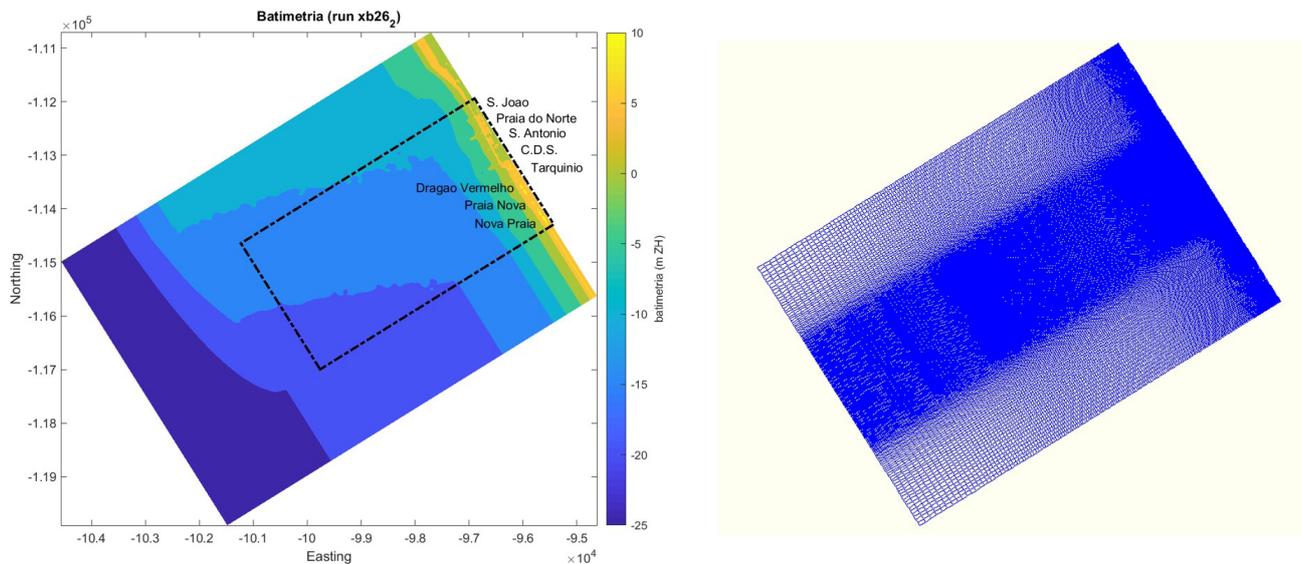
as ondas curtas à escala do grupo de ondas pela sua envolvente superior, recorrendo às equações HISWA (Holthuijsen *et al.*, 1989). Já as ondas infra-gravíticas são resolvidas pela aplicação das equações não-lineares da teoria de onda em condições de água pouco profundas, NLSW (*nonlinear shallow water*). O modo *surf beat* é particularmente útil quando se pretendem modelar processos na zona de espraio (*swash zone*), como é o caso dos processos erosivos em litorais baixos e arenosos, quando os movimentos na zona de espraio (*run-up* e *run-down*) são dominados pela banda infragravítica (e.g. em praia dissipativas (Holman, 1981, 1983; Holman e Sallenger, 1985), ou praias intermédias durante eventos extremos (Wright *et al.*, 1986).

Para o modelo XBeach (em modo *surf beat*), recorreu-se ao acoplamento de um conjunto de dados topo-batimétricos disponíveis, a saber, o modelo batimétrico de alta resolução do rio Tejo (EMODnet, 2019), o modelo LIDAR 2011 para zonas costeiras (DGTerritório, 2011) e levantamentos topográficos entre as praias de Santo António e Traquínio-Paraíso (praia emersa, estruturas de proteção aderentes e seu tardoz) em maio e outubro de 2019, realizados com recurso a *drone* no âmbito do projeto EW-Coast,

pela equipa da UAAlg. Os forçamentos oceanográficos impostos ao modelo foram obtidos através da modelação SWAN, anteriormente descrita.

A zona de estudo encontra-se a sul do estuário exterior do Tejo, onde a batimetria apresenta uma configuração não paralela na aproximação à costa e de baixas profundidades, o que constitui uma dificuldade para a aplicação do modelo XBeach. Assim, para a modelação, a fim de minimizar os constrangimentos impostos pelas condições locais da zona de estudo, foi alargado o domínio computacional, Figura 5 (à esquerda), através da extensão das laterais, para que os problemas que surgem junto às fronteiras laterais não interferissem na área de interesse. Além disso, foi criada uma zona de profundidade constante para a geração das condições de agitação a impor no domínio de cálculo, com profundidade de 25 m, de modo a criar condições de fronteira favoráveis às ondas infragravíticas (McCall, 2017).

A malha e a topo-batimetria correspondente foram geradas recorrendo ao Delft3D, através dos módulos de geração de grelhas Delft3DRGFGRID (Deltares, 2013) e de interpolação da batimetria Delft3DQUIKIN (Deltares, 2020).



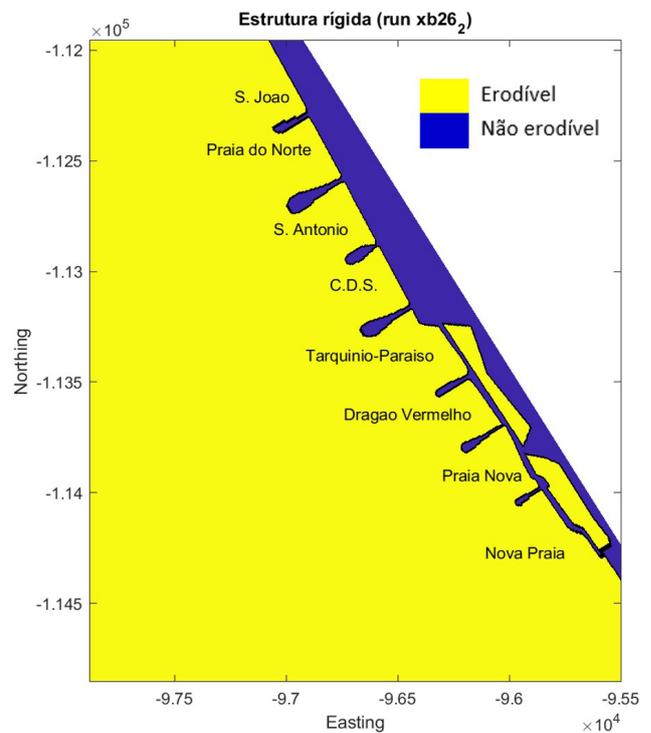
**Figura 5.** À esquerda, batimetria utilizada na modelação XBeach, com indicação da área de interesse, a traço-ponto. À direita, malha estruturada não-regular de 5800 x 8000 m.

Optou-se por uma malha estruturada não-regular, Figura 5 (à direita), com 8000 m, na dimensão transversal à costa, com aumento de resolução na aproximação à praia, resolução máxima de 2 m, compreendendo um total de 345 células. Segundo a dimensão longilitoral, o comprimento total é de 5800 m, com maior resolução na zona entre esporões, resolução máxima de 5 m, com 496 células. Foi imposta uma rotação na malha para que a dimensão transversal se aproximasse da perpendicularidade à linha de costa, na generalidade da área de estudo.

As estruturas rígidas foram consideradas através da definição de zonas não erodíveis, Figura 6, com a aplicação de uma malha de pontos erodíveis e não erodíveis, com as mesmas características e dimensões da malha batimétrica.

Neste estudo, a modelação XBeach é forçada pelos resultados de agitação marítima obtidos pelo SWAN, tendo sido feita uma simulação da tempestade Hércules/Christine, que atingiu a zona de estudo em janeiro de 2014 (Santos e Mendes, 2014). Durante esta tempestade ocorreram várias situações de galgamento na zona de estudo, que foram documentadas por vídeos e jornais, o que se traduz em informação relevante para avaliação dos resultados obtidos com o XBeach.

Os dados sedimentares utilizados resultam da recolha, e posterior tratamento laboratorial, de amostras da zona da praia emersa, por parte da equipa da UAlg, no âmbito do projeto EW-Coast. O material sedimentar foi recolhido em maio de 2019. A parametrização utilizada nesta simulação, Tabela 1, resultou de várias corridas-teste, assim como de testes de sensibilidade.



**Figura 6.** Representação da estrutura rígida definida através da definição de zonas erodíveis e não erodíveis.

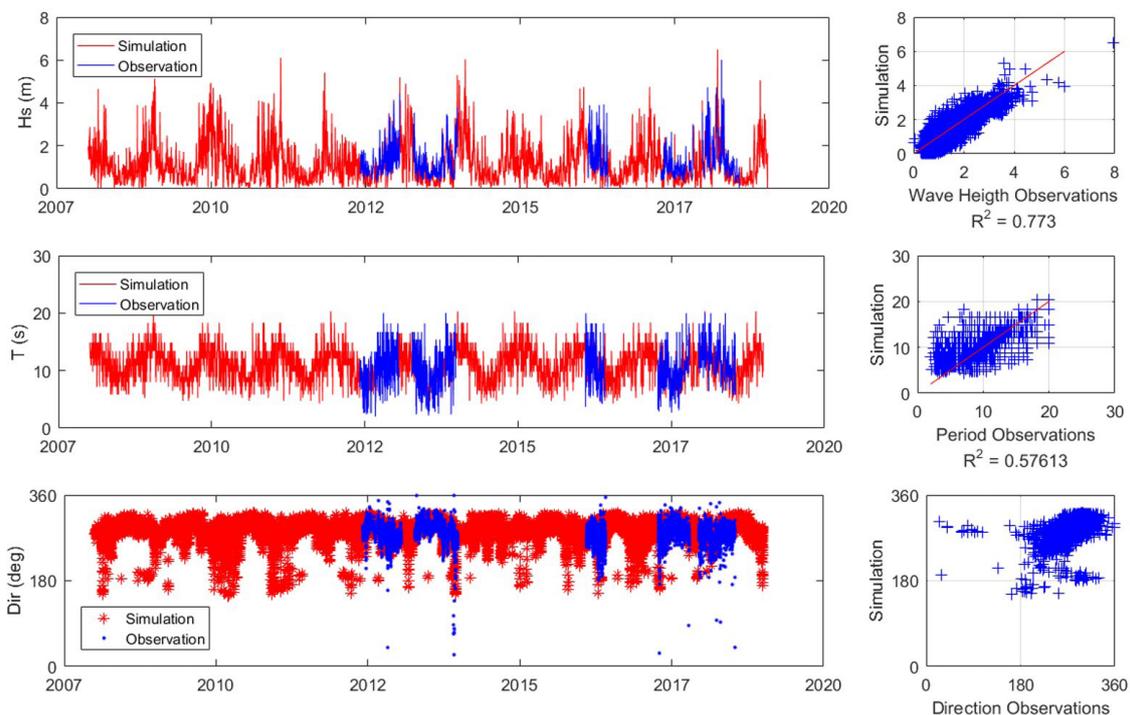
## 2.2 Resultados e Discussão

### 2.2.1 SWAN

Os resultados da propagação da agitação marítima foram validados por comparação com os dados registados na boia ondógrafo da APL. Para a validação, foi feita a simulação da propagação da agitação entre 2008 e 2018.

**Tabela 1.** Parametrização utilizada na modelação XBeach. (A descrição de cada parâmetro pode ser encontrada em: [https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user\\_manual.html](https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html)).

Processos físicos	Parâmetros das condições de fronteira laterais	Parâmetros das condições de rebentação	Parâmetros de escoamento	Parâmetros de transporte sedimentar	Parâmetros morfológicos
wavemodel =surfbeat swave =1 single_dir =1 lwave =1 flow =1 sedtrans =1 morphology =1 avalanching =1 viscosity =1 advection =1	front =abs_2d left =neumann right =neumann back =abs_2d ARC =1 order =2.0000 epsi =-1.0000 tidetype =velocity	break =roelvink2 gamma =.5410 gammamax =2.3640 alpha =1.2620 n =10.0000 delta =.1000	bedfriction =manning bedfriccoef =.0200 nuh =.1000 nuhf =1.0000 nuhv =1.0000 smag =1 hmin =.5000	facua =.1500 bermslope =.1000	morfac =10.0000 hswitch =.0100 struct =1

**Figura 7.** Comparação entre os resultados paramétricos da agitação marítima,  $H_s$ ,  $T_p$  e Dir, no ponto da Boia APL e os registos efetuados pela Boia APL.

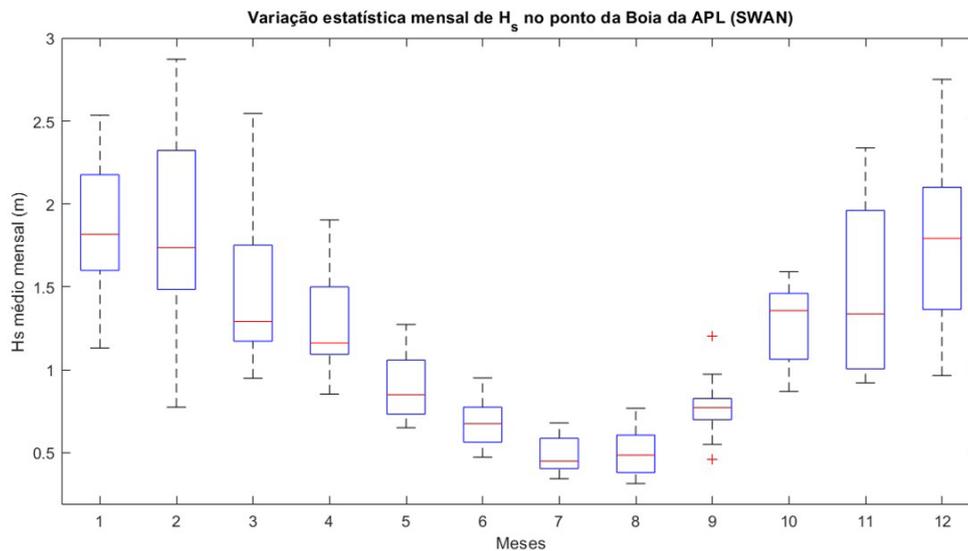
Dos resultados obtidos, Figura 7 e Tabela 2, verifica-se uma boa relação da altura de onda significativa, com um  $R^2$  superior a 0.7, em relação ao período de pico, ainda que menor, a relação continua acima dos 50%. Em geral, face à escala de cada parâmetro, os erros associados foram considerados aceitáveis. Foi feita a caracterização do regime de agitação marítima junto à área de interesse, tendo sido considerado o ponto da Boia APL como representativo. Os parâmetros característicos da agitação marítima apresentam uma variação marcadamente sazonal, Figura 8, entre o verão e inverno marítimos, abril a setembro e outubro a março, respetivamente. Atendendo a esta variação, procedeu-se a uma análise sazonal dos vários parâmetros, assim como às relações entre os parâmetros.

Da análise sazonal no ponto da Boia da APL, Figura 9 (à esquerda), verifica-se a ocorrência de agitação com períodos mais longos no inverno marítimo podendo ultrapassar os 20 s, enquanto no verão raras são as vezes que ultrapassa os 18 s. Note-se, no entanto, que as maiores alturas de onda significativas registem períodos na ordem dos 15 s. Considerando alturas acima dos 4 m, com ocorrência predominante no inverno, os períodos de pico variam entre os 9 s e os 20 s.

Sazonalmente, a agitação no local em análise sofre uma ligeira rotação para sul no inverno marítimo, Figura 9 (à direita) e Figura 10, ainda que mantenha a predominância de WNW, com mais ocorrências vindas de oeste, principalmente relevante na agitação com maiores alturas. Acima dos 4 m, verifica-se uma direção preferencial de oeste, com

**Tabela 2.** Resultados estatísticos e erros associados à modelação da propagação da agitação segundo metodologia adotada no ponto da Boia da APL.

	Dimensão da amostra, N	Viés	RMS	Scatter Index, SI	R <sup>2</sup>
H <sub>s</sub> (m)	31801	-0.185	0.421	0.336	0.773
T <sub>p</sub> (s)	31801	0.225	2.017	0.190	0.576
Dir (° N)	31801	7.4	20.0	---	---



**Figura 8.** Variação estatística mensal de H<sub>s</sub>, entre 2008 e 2018 (Diagrama de extremos e quartis, com a representação da mediana e valores atípicos) no ponto da Boia da APL.

algumas manifestações de WSW características das tempestades subtropicais, referidas em 2.1.1.

### 2.2.2 XBeach

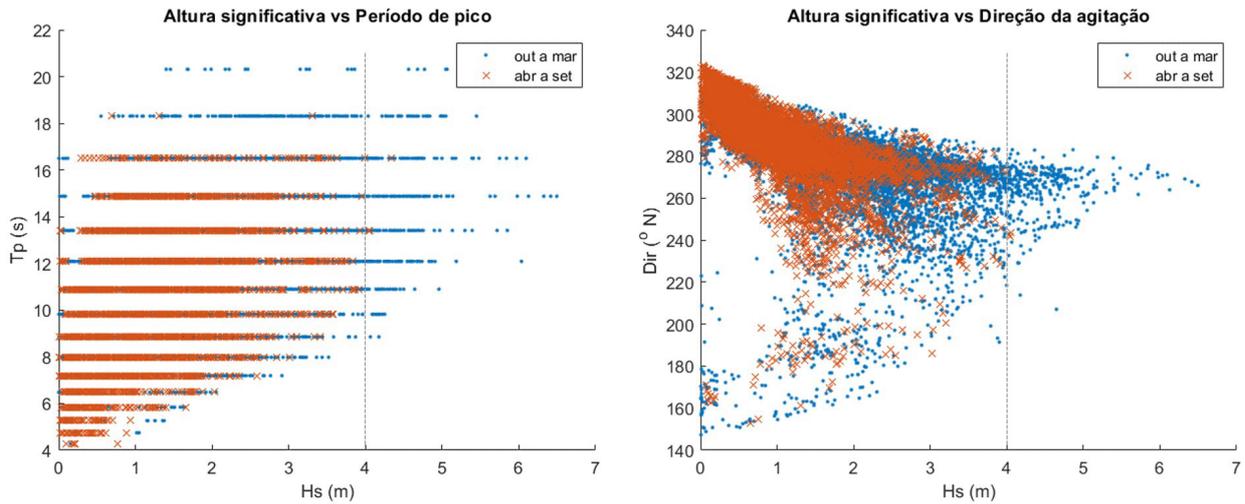
Foi feita uma simulação de 96 h, recorrendo ao modelo XBeach, correspondendo à tempestade Hércules/Christine, entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014. A agitação marítima imposta ao sistema resulta da aplicação do modelo SWAN, atrás descrita, tendo-se obtido uma altura de onda significativa máxima de 5 m, e o nível do mar considerado foi o registado pelo marégrafo de Cascais (Tabela 3 e Figura 11). Nesta modelação, foi considerada uma direção de onda constante, perpendicular ao alinhamento do troço em estudo (238°N).

A análise dos resultados foi feita através da análise espacial (2D) dos resultados e através da análise 1D de oito perfis transversais ao longo do troço costeiro em estudo (um por praia, Figura 1), para os quais foram analisadas as cotas altimétricas máximas alcançadas pelo espraio e a variação morfológica, ao longo das 96 h simuladas.

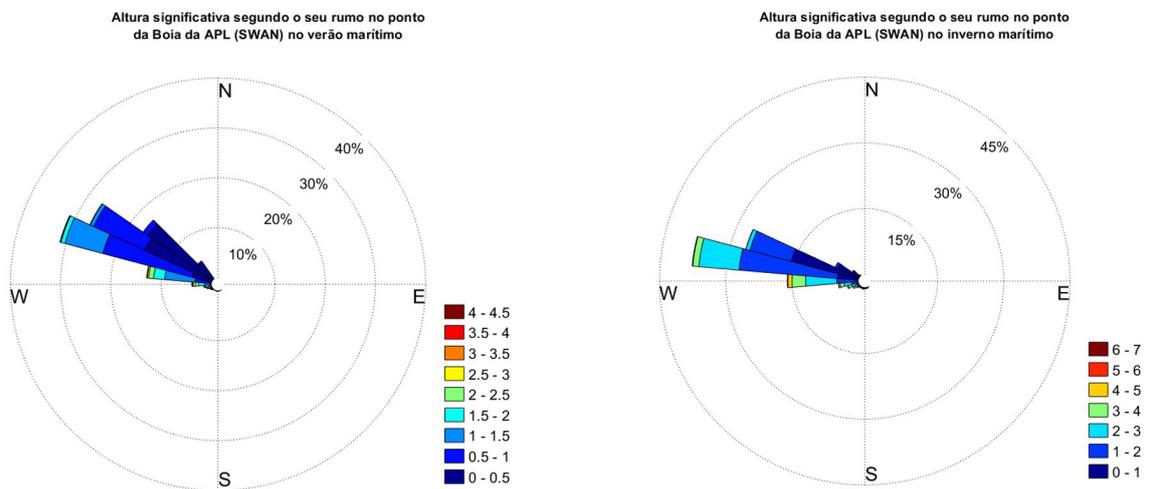
No presente estudo, considera-se que ocorre inundação associada a galgamento costeiro quando o espraio das ondas ultrapassa o coroamento da estrutura de defesa aderente. Pelos resultados

hidrodinâmicos desta simulação, o único local onde ocorreu inundação associada a galgamento foi na praia do Norte, como se pode ver na Figura 12. No entanto, dos registos documentados, durante esta tempestade ocorreram inundações e galgamentos ao longo de toda a estrutura de defesa aderente (e.g. na praia de Santo António, Figura 3). Face às evidências históricas, considera-se que, a partir desta modelação, os valores máximos de alcance do espraio foram subestimados. É importante notar que a batimetria utilizada, por falta de dados, pode não corresponder à situação verificada na altura da tempestade Hércules.

Em relação à variação morfodinâmica, foi analisada toda a área de estudo e foram particularizados oito perfis, um por praia. Os resultados mostram uma elevada movimentação sedimentar. Ao final das 96 h de simulação o panorama geral da zona de estudo é o apresentado na Figura 13. Ao analisar esta figura, verifica-se que em todas as praias existem zonas de acreção e erosão, sendo as zonas de acreção mais significativas na praia submersa, com a criação de barras submarinas, resultante de transporte sedimentar transversal (*cross shore*) das áreas de menor profundidade, onde se vêem valores negativos, representativos de erosão.



**Figura 9.** Análise sazonal dos parâmetros característicos da agitação marítima no ponto da Boia da APL. À esquerda: Distribuição da altura de onda significativa em função do período de pico. À direita: Distribuição da altura de onda significativa em função da direção da agitação.



**Figura 10.** Distribuição sazonal da altura de onda significativa segundo o seu rumo, no ponto da Boia APL. À esquerda, referente ao verão marítimo, entre abril e setembro. À direita, referente ao inverno marítimo, de outubro a março.

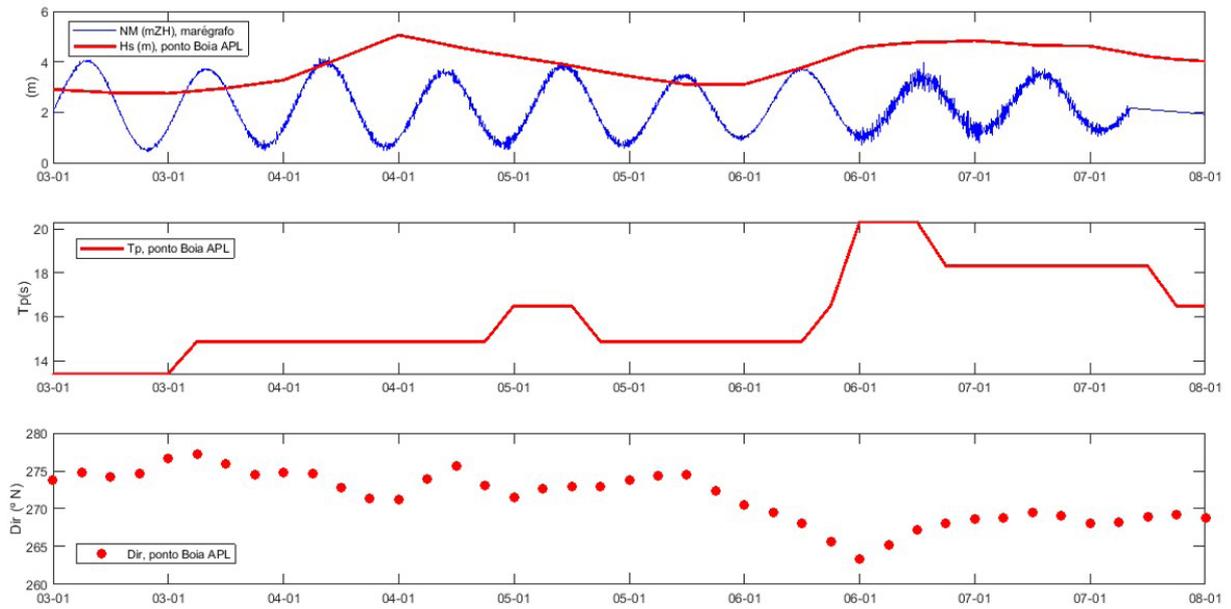
**Tabela 3.** Caracterização dos forçamentos entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014, no ponto da boia da APL.

Hs (m)		Tp (s)		Dir (°N)		Nível do Mar (m ZH)	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2.75	5.06	13.4	20.3	263	277	0.63	3.98

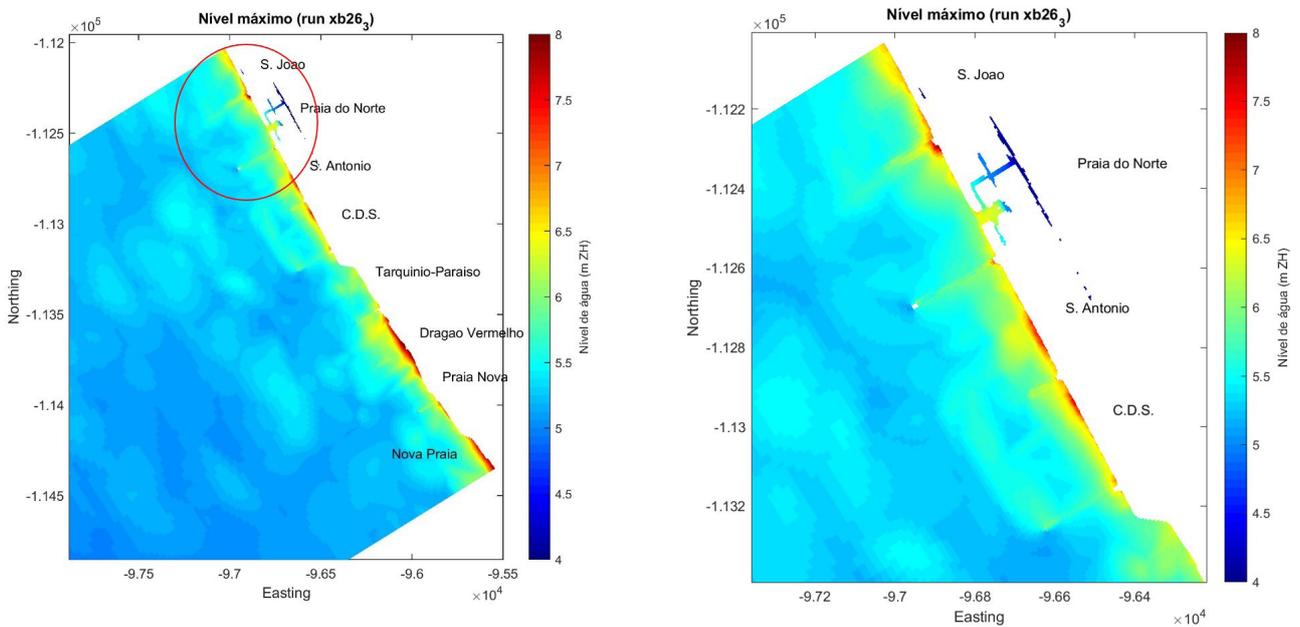
As praias em análise são praias estreitas por confinamento da estrutura rígida aderente, estando a praia emersa praticamente limitada à zona entre marés, podendo inclusive não ter espaço para a formação da berma de praia (nomenclatura adotada de RGCI, 2007). À exceção do perfil 3, os restantes apresentavam um perfil inicial com sistema de lomba-canal, mais ou menos acentuados, que desaparece no decorrer da simulação, dando lugar à formação de uma barra submarina, visível nos perfis 1, 2, 7 e 8. Nalguns perfis, vê-se que durante

a simulação houve a formação de uma pequena escarpa de erosão temporária na zona ativa da praia, ocorrendo algumas destas escarpas na base da estrutura de proteção aderente (perfis 1, 2 e 3). Nos perfis 7 e 8, há um rebaixamento final dos perfis na zona emersa da praia junto da estrutura aderente.

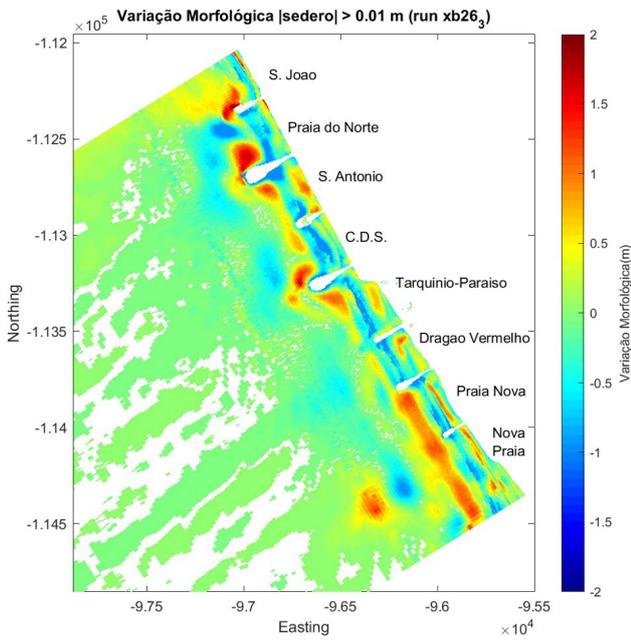
Devido à ausência de perfis pré e pós-tempestade das praias analisadas, não é possível fazer uma avaliação quantitativa dos resultados. Existem levantamentos realizados no âmbito de parcerias



**Figura 11.** Variação das condições oceanográficas entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014. De cima para baixo, nível do mar registado no marégrafo de Cascais e altura de onda significativa no ponto da Boia APL (resultado SWAN); período de pico no ponto da Boia APL (resultado SWAN); e direção da agitação marítima no ponto da Boia APL (resultado SWAN).



**Figura 12.** Nível máximo atingido pela superfície livre na simulação de 96 h recorrendo ao modelo XBeach 2D, com a identificação das praias. À esquerda, o nível máximo atingido na zona de estudo. À direita, um detalhe da Praia do Norte com inundação.



**Figura 13.** Representação da variação morfológica, superior a 0.01 m, no final das 96 h de simulação. Valores positivos significam acreção e valores negativos indicam erosão.

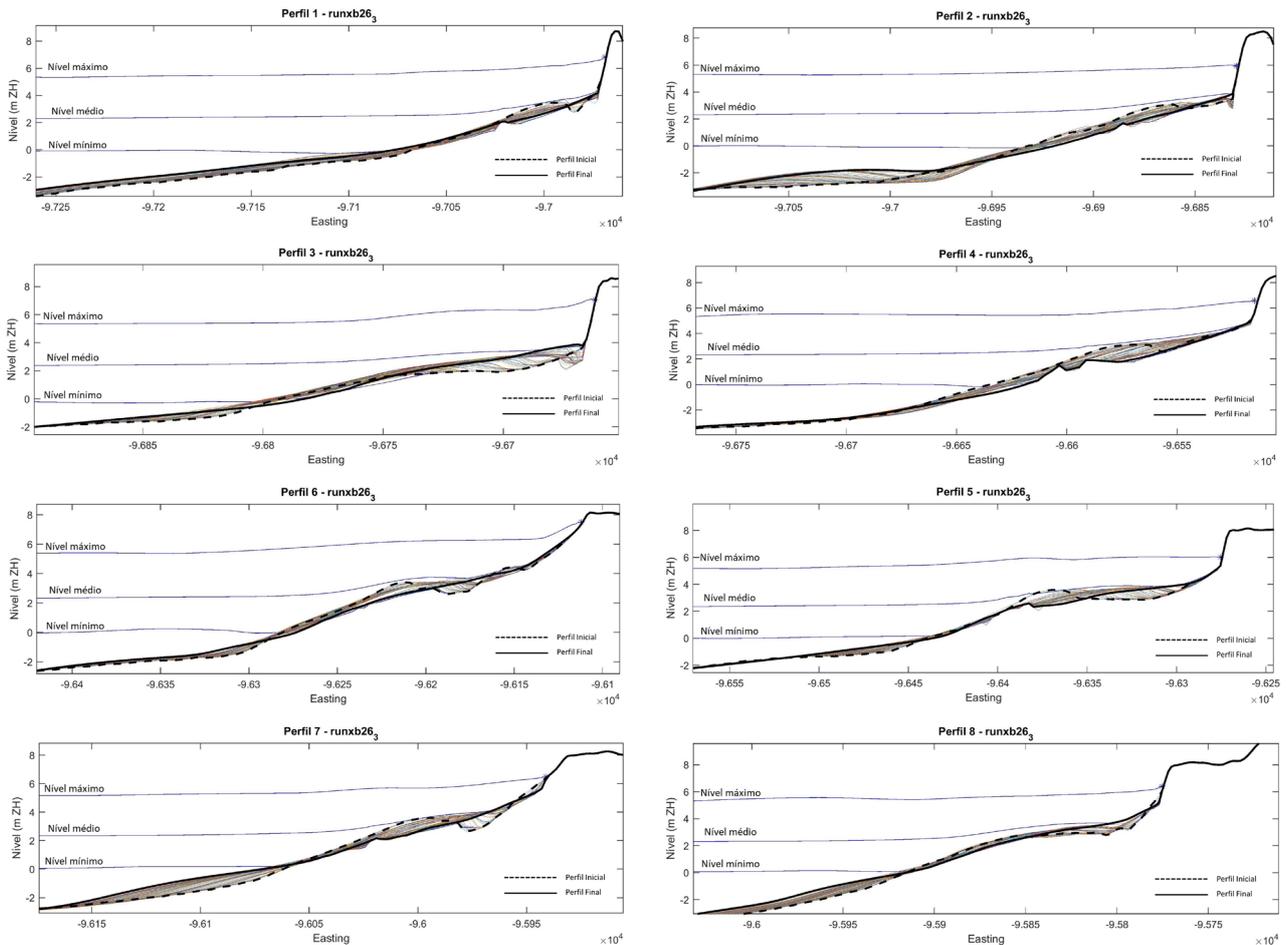
entre a Câmara Municipal de Almada e o Instituto Dom Luiz – Centro de Geologia da FCUL, contudo, em 2014 registaram-se vários eventos, entre os quais dois grandes temporais, o de janeiro e outro em fevereiro, e os levantamentos foram realizados em abril desse ano, pelo que não é possível fazer a comparação desta tempestade específica.

Segundo um relatório realizado pela Agência Portuguesa do Ambiente (Pinto *et al.*, 2014), no que se refere à variação morfológica, houve um rebaixamento generalizados das praias em análise, o mesmo não se verifica com esta simulação.

### 3. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apontam para uma subestima do espraio relacionadas com a parametrização imposta ao modelo XBeach ou com as características da batimetria considerada.

Segundo os estudos de calibração realizados por Vousdoukas *et al.* (2012), as praias mais refletivas aparentam ser mais sensíveis à variação



**Figura 14.** Variação dos perfis de praia durante a simulação das 96 h, pelo XBeach, com a representação dos níveis hidrodinâmicos máximos, médios e mínimos, atingidos pela superfície livre neste período de tempo. Os perfis estão numerados de 1 a 8 e encontram-se dispostos da esquerda para a direita, de cima para baixo.

dos parâmetros de calibração do XBeach. Por outro lado, e por falta de informação, não se dispõe da batimetria da zona de estudo antes da ocorrência da tempestade Hercules/Christine em 2014, principalmente na zona da praia, pelo que os presentes cálculos são efetuados para uma batimetria baseada em levantamentos recentes o que condiciona os resultados obtidos e pode levar a diferenças significativas. Finalmente, este troço costeiro apresenta uma batimetria, em águas intermédias, pouco regular no interior do domínio considerado, e dessa forma, o modelo pode não conseguir responder corretamente aos forçamentos impostos.

Os passos seguintes serão a calibração da parametrização do modelo, a análise da batimetria e a reprodução do modelo em modo 1D, através de um conjunto de perfis ao longo da área de estudo, a fim de validar a modelação para o espraio e a erosão. Após estas será necessário avaliar eventos dos galgamentos e compará-los com as formulações empíricas, e/ou outras metodologias existentes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto com referência ALG-LISBOA-01-145-FEDER-028657 atribuída pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP, suportado pelos orçamentos do Programa Operacional Regional do Algarve e do Programa Operacional Regional de Lisboa na sua componente FEDER e pelo orçamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia na sua componente OE.

Agradecem ainda ao projeto Mosaic.pt - Análise do risco de inundação costeira a partir de múltiplas fontes para comunidades seguras e desenvolvimento sustentável, referência PTDC/CTA-AMB/28909/2017 e ao projeto To-Sealert - Wave overtopping and flooding in coastal and port areas: Tools for an early warning, emergency planning and risk management system, Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017, atribuída pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP.

Ao grupo RG2 - *Earth Surface Processes* do Instituto Dom Luiz.

Também agradecem à Administração do Porto de Lisboa, S.A., pela cedência dos dados de agitação marítima registados pela sua boia ondógrafo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Booij, N., Ris, R. C., e Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>

Carapuço, M. M., Taborda, R., Silveira, T. M., Psuty, N. P., Andrade, C., e Freitas, M. C. (2016). Coastal geoindicators: Towards the establishment of a common framework for sandy coastal environments. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 154, pp. 183–190). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.002>

Costa, M., Silva, R., e Vitorino, J. (2001). Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa. *2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária - Associação Internacional de Navegação*, 20.

Deltares. (2013). *Delft3D 3D/2D modelling suite for integral water solutions User Manual RGFGRID*. [https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/rgfgrid\\_user\\_manual.pdf](https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/rgfgrid_user_manual.pdf)

Deltares. (2020). *Delft3D 3D/2D modelling suite for integral water solutions User Manual QUICKIN*. [https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/QUICKIN\\_User\\_Manual.pdf](https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/QUICKIN_User_Manual.pdf)

Ferreira, J. C. R. (2016). *Ordenamento Ambiental de Frentes Urbanas Litorais em Áreas Baixas de Elevado Risco e Vulnerabilidade ao Galgamento Costeiro. As Infraestruturas Verdes como Estratégia de Resiliência para as Comunidades Costeiras* [FCT-UNL]. <http://hdl.handle.net/10362/19883>

Heleno, A. J. P. (2017). *Avaliação do espraio e inundação nas praias da Costa da Caparica: modelação com o modelo XBEACH* [Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10400.21/7108>

Holman, R. A. (1981). Infragravity energy in the surf zone. *Journal of Geophysical Research*, 86(C7), 6442. <https://doi.org/10.1029/JC086iC07p06442>

Holman, R. A. (1983). Edge waves and the configuration of the shoreline. In Paul D. Komar (Ed.), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion* (pp. 21–34). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351072908-2>

Holman, R. A., e Sallenger, A. H. (1985). Setup and swash on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 90(C1), 945–953. <https://doi.org/10.1029/JC090iC01p00945>

Holthuijsen, L. H., Booij, N., e Herbers, T. H. C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13(1), 23–54. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(89\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(89)90031-8)

Jaranović, B. (2017). *Perigosidade associada a temporais no arco litoral Cascais – Cabo Espichel* [Universidade de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10451/30306>

Pinto, C., Rodrigues, A., Costa, C., e Lima, J. (2014). *Registo das ocorrências no litoral Temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014*. [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioNacional\\_Ocorr\\_Jan\\_2014\\_V5.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioNacional_Ocorr_Jan_2014_V5.pdf)

Poelhekke, L., Jäger, W. S., van Dongeren, A., Plomaritis, T. A., McCall, R., e Ferreira, Ó. (2016). Predicting coastal hazards for sandy coasts with a Bayesian Network. *Coastal Engineering*, 118, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.011>

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., e Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

Rogers, J. C. (1997). North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic oscillation and climate variability of Northern Europe. *Journal of Climate*, 10(7), 1635–1647. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2)

Santos, Â., Mendes, S., e Corte-Real, J. (2014). *Impacts of the storm Hercules in Portugal*. 98, 197–220. <http://www.scielo.mec.pt/pdf/fin/n98/n98a13.pdf>

Vousdoukas, M. I., Ferreira, Ó., Almeida, L. P., e Pacheco, A. (2012). Toward reliable storm-hazard forecasts: XBeach calibration and its potential application in an operational early-warning system. *Ocean Dynamics*, 62(7), 1001–1015. <https://doi.org/10.1007/s10236-012-0544-6>

Wright, L. D., Nielsen, P., Shi, N. C., e List, J. H. (1986). Morphodynamics of a bar-trough surf zone. *Marine Geology*, 70(3–4), 251–285. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(86\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(86)90005-8)

## REFERÊNCIAS INTERNET

EMODnet. (2019). EMODnet Bathymetry Viewing and Download service. Disponível em: <<https://portal.emodnet-bathymetry.eu/>> Acesso em 7 de outubro de 2019

EW-Coast. (2019). EW-Coast – Early warning system for coastal risks induced by storms. Disponível em: <<https://www.cima.ualg.pt/EW-COAST/>> Acesso em 9 de dezembro de 2019

IH. (2013). Modelo batimétrico - do Rio Lis ao Cabo Espichel. Disponível em: <[http://horus.hidrografico.pt/content/dados/ModeloBatimetrico\\_RioLis\\_CaboEspichel.rar](http://horus.hidrografico.pt/content/dados/ModeloBatimetrico_RioLis_CaboEspichel.rar)> Acesso em 7 de outubro de 2019

McCall, R. (2017). RISC-KIT Hotspot Tool - Self-assessment guidance - Webinar. Disponível em: <<https://Oss.Deltares.NI/Web/Xbeach/Webinars.>> Acesso em 13 de janeiro de 2020

RGCI. (2007). Glossário de Gestão Costeira Integrada. Revista de Gestão Costeira Integrada. Associação Portuguesa Dos Recursos Hídricos (APRH). Disponível em: <<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/index.html>> Acesso em 19 de fevereiro de 2020



# Avaliação do Estado Trófico e Proveniência do Fósforo nos Pauis da Praia da Vitória, ilha Terceira, Açores

## *Evaluation of the Trophic State and Provenance of Phosphorus in the Wetlands of Praia da Vitória, Terceira island, Azores*

César PIMENTEL<sup>1</sup>, Francisco RODRIGUES<sup>1</sup>, João MADRUGA<sup>1</sup>, Rui ELIAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestre. Investigador/ Colaborador, Instituto de Investigação e Tecnologias Agrárias e do Ambiente dos Açores, Universidade dos Açores, Rua Capitão João d'Ávila – Pico da Urze 9700-042 Angra do Heroísmo, cesarpimentel.83@gmail.com.

<sup>2</sup> Doutor. Professor Auxiliar. Instituto de Investigação e Tecnologias Agrárias e do Ambiente dos Açores, Universidade dos Açores, Rua Capitão João d'Ávila – Pico da Urze 9700-042 Angra do Heroísmo, francisco.c.rodrigues@uac.pt, joao.s.madruga@uac.pt.

<sup>3</sup> Doutor. Professor Auxiliar. CE3C Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes / Azorean B. Universidade dos Açores, Rua Capitão João d'Ávila – Pico da Urze 9700-042 Angra do Heroísmo, rui.mp.elias@uac.pt.

**RESUMO:** O Graben das Lajes localiza-se na vertente Nordeste do vulcão dos Cinco Picos, entre a escarpa das falhas das Fontinhas, a Sudoeste, e a de Santiago a Nordeste. Do ponto de vista hidrogeológico esta zona está associada ao troço mais oriental do aquífero de base da ilha Terceira, recarregado, em grande parte, nas zonas centrais da ilha onde a precipitação é mais elevada. Para além do aquífero basal o Graben das Lajes comporta duas massas de água subterrâneas suspensas localizadas a profundidades distintas. Na zona litoral Sudoeste do Graben das Lajes existem três zonas lagunares associadas a descargas das massas de água acima referidas – os pauis da Praia da Vitória, do Belo Jardim e da Pedreira do Cabo da Praia. Estas massas de água superficiais têm particular importância ecológica, dada a sua grande biodiversidade.

Na determinação do estado trófico dos três pauis foram utilizados dados da concentração de fósforo total cedidos pela Camara municipal da Praia da Vitória no âmbito do Projeto LIFE CWR, entidade responsável pela gestão destas zonas húmidas. Utilizando o fósforo como variável dependente, foi aplicado o índice do estado trófico de Lamparelli (2004).

Quando aplicado o índice trófico aos três pauis, verificou-se que, entre 2016 e 2017, todos se encontravam num estado predominantemente eutrófico.

Palavras-chave: Trófico; Fósforo; Proveniência.

**ABSTRAT:** *The Graben das Lajes is located on the Northeast side of the Cinco Picos volcano, between the escarpment of the Fontinhas faults, to the Southwest, and Santiago to the Northeast. From a hydrogeological point of view, this area is associated with the easternmost section of the basic aquifer on Terceira island, which is largely recharged in the central areas of the island where rainfall is highest. In addition to the basal aquifer, Graben das Lajes comprises two suspended groundwater bodies located at different depths. In the south-west coastal area of Graben das Lajes there are three lagoon areas associated with discharges from the aforementioned bodies of water - the sand of Praia da Vitória, Belo Jardim and Pedreira do Cabo da Praia. These surface water bodies are of particular ecological importance, given their great biodiversity.*

*In determining the trophic status of the three wetlands, data on the total phosphorus concentration provided by the Praia da Vitória County were used under the LIFE CWR Project, the entity responsible for the management of these wetlands. Using phosphorus as a dependent variable, Lamparelli's trophic status index (2004) was applied.*

*When the trophic index was applied to the three wetlands, it was found that, between 2016 and 2017, all were in a predominantly eutrophic state*

Keywords: Trophic; Phosphorus; Provenance.

## 1. INTRODUÇÃO

Os ambientes insulares distantes das plataformas continentais têm condicionantes biofísicas, nomeadamente os recursos naturais disponíveis, o isolamento e a dispersão geográfica, aliadas às restrições tecnológicas e aos aspetos socioculturais, que determinam o alcance e a manutenção de um desenvolvimento sustentado. Na generalidade, as ilhas tendem a assentar em especializações produtivas, degradando os recursos naturais de que dependem (Beller *et al.*, 1990).

Os Açores são marcados historicamente pelas monoculturas, ditando a utilização abusiva dos recursos naturais, o que contribui significativamente para alterar a sua paisagem. O crescimento acentuado da pecuária para fins industriais, concretamente a produção de leite que emerge após a Segunda Guerra Mundial, dita o alargamento da área de pastagem, destruindo progressivamente a floresta endémica. Este incremento de gado bovino conduziu à aplicação excessiva de fertilizantes, conduzindo pressões insustentáveis sobre os recursos naturais, com especial incidência para as águas interiores superficiais (*e.g.* Lagoas) (Porteiro *et al.*, 2005).

Recetoras dos subprodutos da atividade económica dominante (Pecuária) as lagoas e as zonas húmidas apresentam-se muito vulneráveis às pressões a que estão sujeitas, surgindo sinais inequívocos de eutrofização (acréscimo de nutrientes e consequente deterioração dos padrões de qualidade da água, devido à proliferação de algas). A degradação dos ecossistemas lacustres é considerada uma das principais disfunções ambientais do arquipélago, cuja atividade é reconhecida pela população, pela comunidade científica e pela administração regional. O estado destes corpos hídricos é inegavelmente favorecido pelas características biofísicas dominantes, como: a pequena dimensão da generalidade das massas de água, responsáveis por elevar a sua sensibilidade a qualquer tipo de pressão de origem antrópica; a morfologia instável e o declive acentuado das vertentes das bacias hidrográficas, o que incrementa o regime de escoamento superficial; a presença de materiais erodíveis como cinzas vulcânicas e cascalho, favorecendo o assoreamento dos planos de água; a prevalência do escoamento difuso (rede hidrográfica pouco hierarquizada), o que dificulta o controlo das entradas de nutrientes (Porteiro & Calado, 2003).

Do enriquecimento das águas por compostos nutritivos, principalmente por fósforo e azoto, resulta o fenómeno denominado de eutrofização.

Este provoca o crescimento acelerado da vegetação aquática (UNESCO/WMO, 1992), a ocorrência de espumas superficiais, e os desenvolvimentos explosivos de algas ou cianobactérias (Santos *et al.*, 2004). O impacto resultante da eutrofização manifesta-se na composição das comunidades biológicas e nos padrões de qualidade da água (Casas, 1988<sup>a</sup>). Assim, dependendo da degradação do meio aquático, pode-se classificar as massas de água em classes (estado trófico) que variam entre a oligotrofia e a eutrofia (Wetzel, 1993).

A eutrofização das lagoas dos Açores é atualmente considerada uma das maiores disfunções ambientais presentes no arquipélago, designadamente nos impactos verificados na economia, paisagem ou/e na conservação dos recursos naturais (U.N.L., 1991). Neste sentido surgiram alguns trabalhos de ordem científica, principalmente na Lagoa das Furnas e Sete Cidades, onde foram realizadas várias campanhas de amostragem e de monitorização às suas águas avaliando a evolução do estado trófico destes corpos hídricos e, por conseguinte, analisando as possíveis causas da degradação destes sistemas lacustres. Deste modo, foram verificadas as cargas de fósforo máximas permissíveis e as cargas de perigo de eutrofização, usando os valores de referência de Vollenweider (in Harper, 1992) e também os Índices do Estado Trófico (como por exemplo: Carlson (1977)).

A finalidade da utilização dos índices de estado trófico reside na classificação dos corpos de água em diferentes graus de trofia, visto que avaliam a qualidade de água quanto ao enriquecimento por nutrientes, nomeadamente o fósforo e o azoto, bem como a clorofila.

Neste trabalho foi utilizado o índice do Estado Trófico (IET) de Lamparelli (2004), adaptado para ambientes lênticos, que utiliza o fósforo como variável dependente.

O IET de Lamparelli (2004) foi desenvolvido para climas subtropicais e tropicais, para ambientes lóticos e lênticos. Os ambientes subtropicais caracterizam-se por estarem presentes em áreas de latitudes compreendidas entre 25° e 45°, com temperaturas anuais nunca superiores a 20°C e mínima nunca menor de 0°C. Os ambientes tropicais localizam-se em áreas de latitudes entre os 23° e 26°, com temperaturas anuais médias sempre superiores a 18°C. Este índice foi desenvolvido a partir do índice de Carlson (1977), que se aplica a regiões temperadas, caracterizadas por apresentarem amplitudes de temperaturas médias elevadas, oscilando entre os -3°C no inverno e 18°C no verão.

A temperatura é um fator determinante na

produtividade primária de um corpo de água, pois as temperaturas muito baixas ou mesmo negativas diminuem muito significativamente a atividade fotossintética (Wetzel, 1993).

As zonas hídricas de estudo localizam-se no setor Nordeste da ilha Terceira, designadamente na baía da Praia da Vitória, nos Açores, entre as latitudes 36° e 43°. O clima é classificado como temperado, sendo o verão seco e temperado (Csb), segundo classificação de Köppen (1936), com valores médios de temperatura no verão que variam entre os 24°C e os 26°C; e de inverno com temperaturas superiores a 12°C nas zonas costeiras (IMP, 2011). Tendo por base o fator temperatura, a aplicação do IET de Lamparelli (2004) nas massas de água em estudo considera-se adequado.

## 2. ENQUADRAMENTO

A ilha Terceira é uma das ilhas constituintes do arquipélago dos Açores, localiza-se no Oceano Atlântico, nas coordenadas: 27°10' de longitude Oeste e 38°40' latitude Norte. Tem uma área total de 381,96 km<sup>2</sup> e uma população com cerca de 55800 habitantes.

Os pauis da Praia da Vitória (PPV), Belo Jardim (PBJ) e Pedreira do Cabo da Praia (PPCP) localizam-se no sector Sudoeste da ilha Terceira, na orla costeira do *Graben* das Lajes. Correspondem a pequenas massas de água superficiais associadas a descargas difusas do aquífero basal. Dois destes pauis ocorrem em zonas sedimentares constituídas por dunas, o Paul da Praia da Vitória e do Belo Jardim, e o Paul da Pedreira do Cabo da Praia, numa depressão lávica correspondente a uma antiga pedreira. Em conjunto formam a chamada Infraestrutura Verde Húmida Costeira da Praia da Vitória (IVHCPV) (Pimentel, 2019). São ecossistemas com uma biodiversidade muito rica, com uma grande diversidade de avifauna durante as migrações.

O PPV localiza-se a Sudoeste do *Graben* das Lajes, a menos de 500 m da linha de costa junto à cidade da Praia da Vitória. Do ponto de vista hidrológico caracteriza-se por apresentar uma lagoa costeira de água salobra, proveniente de uma série de nascentes difusas do aquífero basal e pela entrada de água do mar através de condutas.

Localizado no sector Sudoeste do *Graben* das Lajes, o PBJ situa-se no extremo da Plataforma das Fontinhas e na faixa litoral da Baía da Praia da Vitória. A sua configuração atual resume-se a uma pequena área lagunar recentemente reabilitada, o que corresponde a 5% da área primitiva. Esta massa de água superficial, situada junto a um sistema dunar e a menos de 50 m da linha de costa, caracteriza-se por apresentar um nível freático com

poucas oscilações. É alimentada por nascentes basais difusas, provavelmente associadas a vias preferenciais de circulação impostas pelas falhas das Fontinhas e do Barreiro (Pimentel, 2019).

O PPCP localiza-se no sector Sudoeste do *Graben* das Lajes. A sua área lagunar está disposta sobre uma antiga pedreira, onde as escoadas lávicas são periodicamente inundadas por água salgada em função das oscilações da maré. É alimentado pela precipitação, por pequenas descargas difusas do aquífero de base e por nascentes de água doce associadas a pequenos aquíferos suspensos que surgem ao longo das arribas circundantes (Pimentel, 2019).

O clima da ilha Terceira é classificado como temperado, sem estação seca, com verão temperado (Cfb), porém regista-se também um clima temperado com verão seco e temperado (Csb), sobretudo na faixa litoral da ilha (IMP, 2011). Segundo os dados medidos na Estação Meteorológica da Base das Lajes, os valores médios anuais da temperatura rondam os 17°C, sendo agosto o mês mais quente, com temperaturas médias de 21°C e máximas de 29°C, e fevereiro o mais frio, com temperaturas médias de 14°C e mínimas de 11°C (Novo, 2001).

A precipitação é mais abundante nos meses de novembro, dezembro e janeiro, registando-se em média, durante estes meses, quantidades superiores a 500mm. Entre os meses de junho e agosto regista-se uma média de 21,6 mm (IMP, 2011).

Em termos de geologia, a ilha Terceira é constituída por três grandes aparelhos vulcânicos distintos: o vulcão dos Cinco Picos, localizado no setor oriental da ilha, o Guilherme Moniz – Pico Alto, disposto no terço central, e o de Santa Bárbara, formando o setor mais ocidental da ilha. De acordo com Rodrigues (2002), os dois primeiros inserem-se no rift da Terceira.

O *Graben* das Lajes é uma depressão tectónica localizada na vertente Nordeste do vulcão dos Cinco Picos, orientada no sentido Noroeste-Sudeste e limitada pela escarpa de Santiago a Nordeste, pela falha das Fontinhas a SW e pelo mar nos sectores Norte e Sul. De acordo com Rodrigues (1993 e 2002), estas duas falhas, em conjunto com outras que conformam o fundo dessa zona deprimida, onde desempenham um papel crucial na hidrogeologia de toda esta região. O seu estrato geológico é de natureza traquibasáltica, que lhe confere permeabilidades elevadas, com boas taxas de infiltração (Leitão, 2010). Como já foi mencionado anteriormente, devido à grande permeabilidade dos terrenos, a densidade de drenagem é baixa e a rede de cursos de água é pouco estruturada (Rodrigues, 1993).

No que confere à hidrologia subterrânea, o *Graben* das Lajes comporta dez aquíferos suspensos dispostos em degrau, formando várias massas de água subterrâneas contíguas (Pimentel, 2019). Comporta ainda um aquífero basal único que abrange a totalidade da ilha Terceira (Paradela, 1980, Rodrigues, 1993 e Rodrigues, 2002), o qual é um dos responsáveis pela existência dos três paus, através das descargas de nascentes difusas em zonas topograficamente deprimidas (Rodrigues, 2002).

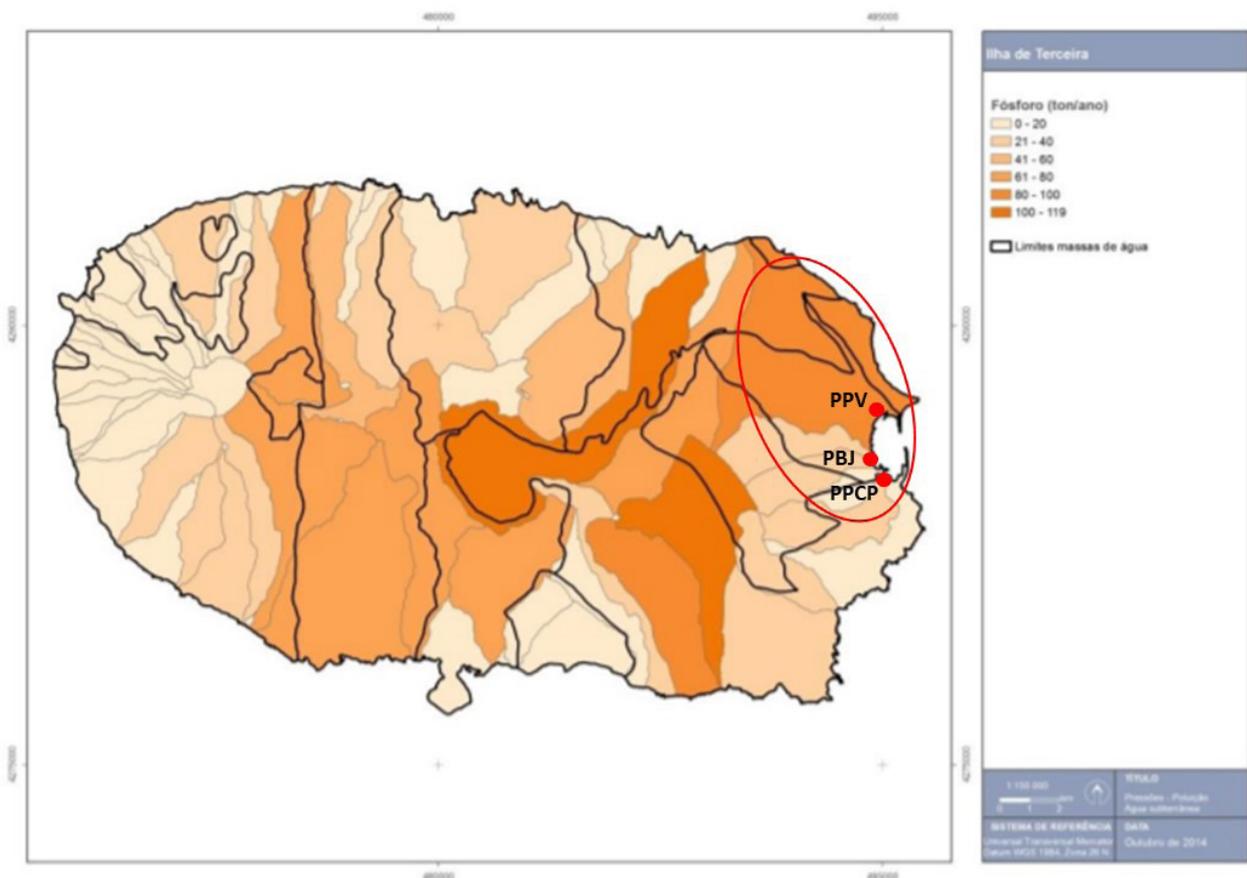
Apesar de geograficamente muito próximos, o uso do solo é um pouco diferenciado em cada um dos três paus. O PPV localiza-se junto à cidade da Praia da Vitória, está sujeito a pressões de cariz urbano, tais como a descarga de águas pluviais da rede separativa da cidade e também por alguns campos agrícolas a montante. O PBJ insere-se logo atrás do sistema dunar existente na Praia da Riviera e é circundado por pastagens e por um aglomerado pequeno habitacional. Já o PPCP faz fronteira com o mar a Noroeste a Norte por um parque industrial e a NE e Este por pastagens. Deste modo, os paus encontram-se sujeitos a pressões antrópicas diversas, ou seja pela agricultura, aglomerados

urbanos e industriais (Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores (PGRH, 2016 – 2021)). Segundo o Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores (2016 – 2021), a zona de estudo é considerada como uma das zonas com grandes quantidades de fósforo nas águas subterrâneas (118 Mg/ano) provenientes da formação mais superficial (Ignimbritos das Lajes). A média das bacias hidrográficas da ilha Terceira ronda os 22.7 Mg/ano, evidenciando cargas difusas relacionadas com a atividade pecuária.

Na figura 1 estão representadas as cargas poluentes estimadas totais anuais de fósforo nas bacias hidrográficas na ilha Terceira. Como se pode observar a zona sudoeste do *Graben* das Lajes, é uma das que oferece maior risco de poluição associado a este elemento químico.

As cargas de fósforo total nas bacias hidrográficas evidenciam bem o predomínio das cargas difusas, em especial relacionadas com a atividade pecuária, conforme se pode observar na figura 1. Esta é a atividade que mais polui a área de estudo.

No que diz respeito ao risco de poluição tóxica doméstica, realça-se a área onde se situa o PPV e o PBJ (Figura 2) e a industrial no PPCP (figura 3).



**Figura 1.** Representação cartográfica de carga poluente de fósforo total na ilha Terceira. Adaptado de PGRH (2016 - 2021).

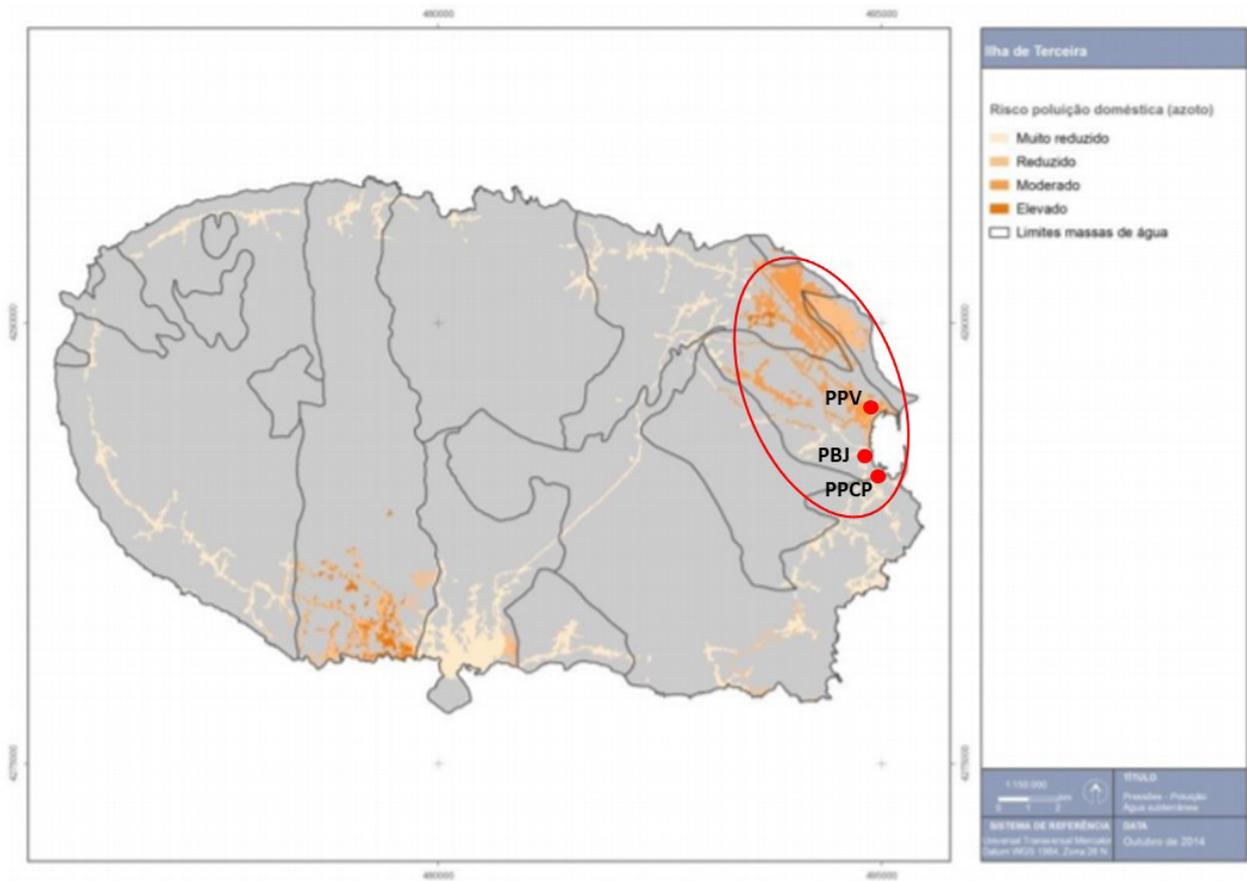


Figura 2. Representação cartográfica de poluição tóxica doméstica na ilha Terceira. Adaptado de PGRH (2016 - 2021).

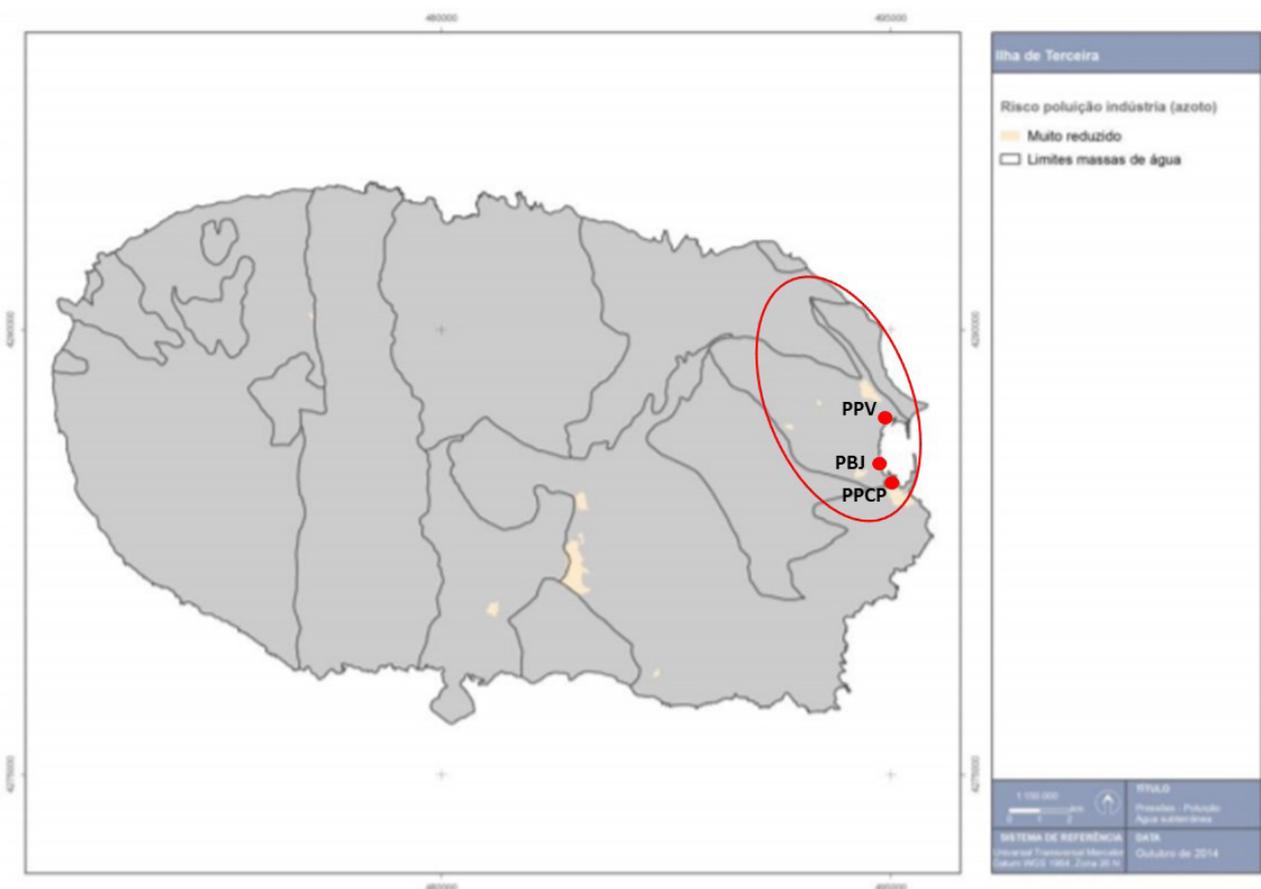


Figura 3. Representação cartográfica de poluição tóxica industrial na ilha Terceira. Adaptado de PGRH (2016 - 2021).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Na avaliação do estado trófico foram utilizados dados referentes à concentração de fósforo dos pauis da baía da Praia da Vitória, cedidos pela Camara Municipal da Praia da Vitória no âmbito do Projeto LIFE CWR. As amostras de água foram recolhidas mensalmente pela entidade durante os anos de 2016 e de 2017, e determinadas analiticamente nos laboratórios do INOVA.

Para a avaliação do índice do estado trófico (IET) em ambientes lênticos foi utilizado o Índice de Lamparelli (2004), conforme o especificado na equação 1.

$$IET(PT) = 10 * (6 - \frac{(1,77 - 0,42 * (\ln PT))}{\ln 2}) \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

IET- Índice de estado trófico em relação à variável fósforo total para ambientes lênticos;

PT- Concentração de fósforo total na superfície ( $\mu\text{g L}$ );

Ln - Logaritmo natural.

Na interpretação dos resultados utilizou-se a classificação proposta por este autor, utilizando-se as ponderações definidas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Valores limite das concentrações de fósforo total para os diferentes níveis tróficos, segundo a classificação proposto por Lamparelli (2004), (Adaptado de Lamparelli (2004)).

Estado trófico	Ponderação
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$
Hipereutrófico	$IET > 67$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Níveis de fósforo presentes nas zonas húmidas em estudo

Na Figura 1 expressam-se os teores de fósforo mensais no PPV, PBJ e PPCP entre 2016 e 2017.

Como se pode verificar no ano de 2016, o fósforo total no PPV variou entre  $49 \mu\text{g/L}$ , no mês de julho, e os  $288 \mu\text{g/L}$  em março, enquanto que em 2017, o valor variou entre  $26 \mu\text{g/L}$  (janeiro) e  $333 \mu\text{g/L}$  (março) (Tabela 2). Este facto demonstra que os níveis deste elemento variam de forma muito significativa, ao longo do ano.

No PBJ apenas estão disponíveis dados referentes ao ano de 2017, após a sua reabilitação e tendo em vista a reconstrução do ecossistema primitivo. Como se pode observar, os valores de fósforo total são elevados, oscilando entre  $314 \mu\text{g/L}$ , em maio, e  $554 \mu\text{g/L}$ , em abril. A elevada concentração neste paul pode estar relacionada com a atividade agropecuária a montante, onde se aplicam chorumes no mês de março antes das lavouras. Como as pastagens nesta zona se situam a uma cota inferior a 10 m, podem observar-se fenómenos de lixiviação para o aquífero basal, o qual, como já anteriormente referido, é o único responsável pela existência deste corpo hídrico (Tabela 2).

Relativamente ao PPCP, verifica-se no ano de 2016 um valor mínimo de  $38 \mu\text{g/L}$  (novembro) e de  $149 \mu\text{g/L}$  (agosto). Em 2017, este elemento variou entre  $18 \mu\text{g/L}$  (abril) e  $169 \mu\text{g/L}$  (fevereiro). Dos três pauis monitorizados, este é o que apresenta as menores concentrações de fósforo (Tabela 2), facto a que não pode deixar de estar associada a sua localização. Efetivamente, o PPCP, ao situar-se no extremo sul da Baía da Praia, num local onde se extraiu pedra para a construção do Porto Oceânico da Praia da Vitória, não sofre grande interferência da atividade agropecuária, quer ao nível do escoamento superficial de fertilizantes, quer de processos de lixiviação de chorumes, pois os terrenos a montante situam-se a uma cota superior aos 26 metros.

#### 3.2. Aplicação do Índice de Lamparelli (2004)

Na tabela 3 mostra-se para os três pauis o Índice do Estado Trófico de Lamparelli (2004) mensal, bem como a classificação trófica mensal nos anos de 2016 e 2017 e os valores médios deste parâmetro. Da sua análise constata-se o seguinte:

a) nos dois anos em análise no PPV registaram-se estados tróficos que oscilaram entre o mesotrófico (4,34%) e o hipereutrófico (17,39%), sendo em termos médios supereutrófica a água em 2016 e eutrófica em 2017.

b) no PBJ (é) a água é hipereutrófica na (grande) maioria dos registos mensais, com exceção do mês de fevereiro, que registou o estado de supereutrofia

c) no PPCP existem vários estados tróficos nos dois anos em análise, com valores que oscilaram entre o mesotrófico, (39,13%) e o eutrófico (60,86 %), sendo em termos médios eutrófico. Em termos médios, quando aplicado o IET de Lamparelli (2004), verifica-se no PPV a ocorrência de dois estados tróficos, o superreutrófico e o eutrófico, sendo este último dominante praticamente nas quatro estações (Tabela 2). No PBJ verifica-se que independentemente da estação do ano, é o estado hipereutrófico é que predomina (Tabela 3).

**Tabela 2.** Concentrações de fósforo mensais registadas no PPV, PBJ e PPCP nos anos de 2016 e 2017, expressos em µg/L.

Ano	Mês	PPV	PBJ	PPCP	Ano	Mês	PPV	PBJ	PPCP
2016	-	-	-	-	2017	Jan	26	-	70
	Fev	277	-	51		Fev	110	326	169
	Mar	280	-	64		Mar	333	402	92
	Abr	135	-	62		Abr	62	554	28
	Mai	68	-	104		Mai	80	314	84
	Jun	63	-	69		Jun	73	486	58
	Jul	49	-	67		Jul	159	499	51
	Ago	59	-	149		Ago	200	471	41
	Set	150	-	63		Set	225	570	60
	Out	156	-	58		Out	210	381	53
	Nov	166	-	38		Nov	91	283	51
	Dez	188	-	41		Dez	62	646	29
Média	145	-	70	Média	136	448	66		
Mediana	150	-	63	Mediana	101	471	56		
Máximo	280	-	149	Máximo	333	646	169		
Mínimo	49	-	38	Mínimo	26	283	28		
Quartil 25	66	-	55	Quartil 25	70	354	49		
Quartil 75	177	-	68	Quartil 75	203	527	74		

**Tabela 3.** Aplicação do IET de Lamparelli (2004) por mês e estação no PPV, PBJ e PPCP.

Ano	Estação	Mês	Concentração de Fósforo Total (ug/L) PPV	Média por Estação PPV	Índice Trófico	Estado Trófico PPV	Concentração de Fósforo Total (ug/L) PBJ	Média por Estação PBJ	Índice Trófico	Estado Trófico PBJ	Concentração de Fósforo Total (ug/L) PPCP	Média por Estação PPCP	Índice Trófico	Estado Trófico PPCP	
2016	Inverno	Fev	277	277	68,5	Supereutrófico	-	-	-	-	51	51,0	66,1	Supereutrófico	
		Primavera	Mar	280	161	65,3	Supereutrófico	-	-	-	-	64	76,7	68,6	Hipereutrófico
			Abr	135				-	-	-	62				
	Mai	68	-	-	-	104									
	Verão	Jun	63	57	59,0	Eutrófico	-	-	-	-	69	95	69,9	Hipereutrófico	
		Jul	49				-	-	-	67					
		Ago	59				-	-	-	149					
	Outono	Set	150	157,3	65,1	Supereutrófico	-	-	-	-	63	53	66,4	Supereutrófico	
		Out	156				-	-	-	58					
		Nov	166				-	-	-	38					
	2017	Inverno	Dez	188	108	62,8	Eutrófico	-	-	-	-	41	93,3	69,8	Hipereutrófico
			Jan	26				-	-	-	70				
Primavera		Fev	110	158,3	65,2	Supereutrófico	326	326	69,5	Hipereutrófico	169	68,0	67,9	Supereutrófico	
		Mar	333				402	423,3	71,1	Hipereutrófico	92				
		Abr	62				554				28				
Mai		80	314	84											
Verão		Jun	73	144	64,6	Supereutrófico	486	485,3	71,9	Hipereutrófico	58	50	66,0	Supereutrófico	
		Jul	159				499				51				
		Ago	200				471				41				
Outono		Set	225	175,3	66,9	Supereutrófico	570	411,3	70,9	Hipereutrófico	60	54,7	66,5	Supereutrófico	
		Out	210				381				53				
		Nov	91				283				51				
Inverno	Dez	62	62	66,9	Supereutrófico	646	646	73,7	Hipereutrófico	29	29	62,7	Eutrófico		

No caso do PPCP constata-se que o IET varia entre eutrófico e hipereutrófico, não havendo um padrão estabelecido, ou seja, na primavera de 2016 obteve-se um estado de hipereutrofia e na primavera de 2017, um estado de supereutrofia, o mesmo acontecendo para o resto das estações do ano (Tabela 3).

### 3.3 Discussão dos resultados

Como forma de perceber como se processa a entrada do fósforo nas massas de água estudadas, Pimentel (2019) analisou as correlações entre o fósforo total e a precipitação, temperatura da água, condutividade, pH, CBO5 (Carência Bioquímica de Oxigénio aos cinco dias) e CQO (Carência Química de Oxigénio), tendo sido utilizados dados referentes aos anos de 2016 e 2017.

Pimentel (2019) constatou que nenhuma das correlações foi significativa, confirmando que a entrada do nutriente nestes corpos de água depende de outros fatores.

As concentrações de fósforo total no PPV podem ser explicadas pelo transporte direto do nutriente através das condutas pluviais. Estas recebem o escoamento superficial de uma grande parte da cidade da Praia da Vitória, desaguando diretamente neste corpo hídrico, o qual transporta todo o tipo de substâncias químicas, admitindo-se a entrada de detergentes e de outros compostos que integram fósforo. Esta suposição assenta no facto de existirem ligações clandestinas de águas residuais para as condutas de águas pluviais (Pimentel, 2019).

Uma vez que o nível piezométrico do aquífero de base nas imediações do local é muito baixo, na ordem de 1 m (Leitão, 2010 e Pimentel, 2019), a existência de explorações agrícolas e fossas sépticas na vizinhança, pode contribuir para o transporte direto do fósforo para esta massa hídrica via subterrânea, embora de caráter local.

No caso do PBJ, dada a sua orografia relativamente plana do terreno onde está implantado, e a elevada permeabilidade dos terrenos dispostos a montante (dunas), o escoamento superficial até esta massa de água é muito limitado. A sua alimentação faz-se sobretudo através de descargas do aquífero de base (Pimentel, 2019).

Em termos comparativos, os níveis de fósforo do PBJ são os mais elevados das três massas de água estudadas. Este facto poderá estar associado à grande atividade agrícola que se faz sentir nas imediações deste corpo hídrico e na existência de várias fossas sépticas muito próximas.

A entrada de fósforo no sistema aquático do PPCP pode ser explicada pelos seguintes fatores: influência bacteriana; fluxo subterrâneo; conduta de águas residuais; e excrementos de aves migratórias.

Segundo Frevert (1979), a comunidade bacteriana em condições de anaerobiose, as trocas inorgânicas nos sedimentos dão-se na interface água-sedimento e são fortemente influenciadas pelas condições redox. A probabilidade de os dois sedimentos terem um papel importante na migração ativa do fósforo para a água é assim considerável. Hynes & Greib (1970) verificaram que em sedimentos anóxicos não perturbados, em períodos entre 2 a 3 meses, o fósforo desloca-se sem dificuldade para a coluna de água, a uma profundidade de pelo menos 10 cm, independentemente da lama ser eutrófica calcária, ou de natureza turfosa e ácida. Caso exista agitação ou turbulência na água, como é o caso do PPCP, estes autores afirmam que a taxa de libertação de fósforo aumenta e quase duplica.

O fluxo de água subterrâneo neste paul é feito a partir de descargas difusas no aquífero basal e de três aquíferos suspensos, transportando este elemento químico das explorações agrícolas e das freguesias localizadas no sector sul do Graben das Lajes (Pimentel, 2019).

Existe uma conduta de águas residuais proveniente do parque industrial do Cabo da Praia, que desagua junto ao paul, muito provavelmente será esta a entrada mais importante do fósforo na zona húmida, entrando por via das oscilações diárias da maré.

Outra entrada provável de fósforo é feita pelos excrementos das aves, os quais são muito ricos em fósforo, uma vez que o local é muito frequentado por aves marinhas e limícolas nas suas migrações sazonais.

## CONCLUSÃO

Os Açores são caracterizados pelas suas lagoas costeiras, como a Lagoa da Fajã de Santo Cristo e os três pauis em estudo, e pelas suas muitas interiores, como é o caso da Lagoa das Sete Cidades, Lagoa das Furnas, Lagoa do Caldeirão, entre outras. Estas desempenham funções vitais no funcionamento e manutenção dos sistemas naturais das ilhas (Porteiro, 2000), funcionando como ecossistemas de suporte a comunidades de zonas húmidas ameaçadas de extinção (Constância *et al.*, 1997).

O Índice do estado trófico de Lamparelli (2004) pode ser considerado como uma boa ferramenta no conhecimento do grau de trofia em ambientes lênticos, tendo em conta que pode ser aplicado nos Açores, mesmo sendo desenvolvido para regiões de climas subtropicais, já que em termos de gradientes de temperatura são muito semelhantes. Este índice apresenta ainda vantagens em relação a outros índices "tradicionais", dado que pode dar a

indicação do estado trófico a partir da concentração de um só elemento, como fósforo, a clorofila ou a transparência. Esta particularidade torna-se importante em estudos desta natureza, sobretudo em termos de custos, bastando a análise de um só elemento.

A análise do estado trófico para os três pauis permitiu concluir que: quando aplicado Índice do Estado Trófico de Lamparelli (2004), o PPV é classificado como supereutrófico (2016) e eutrófico (2017), enquanto o PBJ é hipereutrófico (2017) e o PPCP é eutrófico em 2016 e 2017.

O fósforo presente nos três pauis tem provavelmente origens diferenciadas, admitindo-se que no PPV, este chegará através das condutas de águas pluviais e pela migração deste na água subterrânea; no PBJ, a partir de descargas do aquífero basal; e no PPCP, partindo dos sedimentos por influência de bactérias anaeróbicas, migração através de fluxos subterrâneos e excrementos de aves migratórias.

Uma das formas de redução das entradas dos elementos químicos responsáveis por fenómenos de eutrofização nos pauis da Praia da Vitória, passa pela forma como é gerido o uso do solo, designadamente a redução da fertilização intensiva das pastagens que circundam o PBJ e o PPCP, e para o PPV um redireccionamento das condutas de águas pluviais. Por fim deverão ser sempre monitorizadas em termos de qualidade de água, acompanhando o seu estado de saúde ecológico.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Projeto LIFE CWR e à Câmara Municipal da Praia da Vitória, em particular à Eng<sup>a</sup>. Elisabete Nogueira, pelo o apoio prestado e pela cedência dos dados que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

Beller, W., d'Ayala, P. & Hein, P. 1990. Observations and recommendations of the interoceanic workshop, Puerto Rico, 1986. In: Beller, W., d'Ayala, P. & Hein, P. (Ed.) Sustainable development and environmental management of small islands, 5:365-396. Man and the Biosphere Series. UNESCO/Parthenon Publishing Group. Paris.

Carlson, R. E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22 (2):361- 369.

Casas, J. 1988a. Características Generales del Proceso de Eutrofización. Curso sobre la Eutrofización de Embalses. Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo. Madrid.

Constância, J.; Braga, T.; Nunes, J.; Machado, E.; Silva, L. 1997. Lagoas e Lagoeiros da Ilha de São Miguel. Associação Ecológica Amigos dos Açores. Ponta Delgada.

Frevert, T., 1979. Phosphorus and iron concentrations in the interstitial water and dry substance of sediments of Lake Constance (Obersee). *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 55: 298–323.

Harper, D. 1992. *Eutrophication of Freshwaters*, Chapman & Hall, London, 327 pp.

Hynes, H. B. N. & Greib, B.J. 1970. Movement of phosphate and other ions from and through lake muds. *J. Fish. Res. Bd. Canada*.

Instituto de Meteorologia de Portugal (IMP), 2011: Atlas Climático dos Arquipélagos das Canárias, da Madeira e dos Açores. Temperatura do ar e Precipitação (1971 – 2000). Versão Digital.

KÖPPEN, W., 1936: Das geographische System der Klimate. En: *Handbuch der Klimatologie*, band I, teil C. Edited by Köppen, W. and Geiger. Berlin.

Lamparelli, M. C. 2004. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese de Doutorado em Ecologia Aplicada. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Leitão T.E., 2010. Análise e Parecer sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimento do Concelho de Praia da Vitória – Açores. Relatório final das águas subterrâneas. LNEC - Relatório 424/2010 – NAS.

Novo, M.E. Rodrigues, F.C., Lobo Ferreira, J.P., Azevedo, E.B. 2001 – Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas dos Açores. Fase 3 - Relatório Final. Relatório LNEC 239/01 – GIAS.

Paradela, P.L., 1980. Hidrogeologia Geral das Ilhas Adjacentes. Comun. Serv. Geol. Portugal.

PGRH - Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores 2016-2021. Governo dos Açores.

Pimentel, C. M. M. 2019. Avaliação do Sistema Hidrográfico Sudeste do Graben das Lajes. Projeto de Mestrado em Engenharia e Gestão de Sistemas de Água. Universidade dos Açores.

Porteiro, J. & Calado, H. & Pereira, M. & José, E. & Ventura, J. & Paramio, L. (2005). Planeamento Biofísico e Gestão de Ecossistemas Lacustres: as Lagoas dos Açores 1.

Porteiro, J. & Calado, H. 2003. Elementos para a Requalificação Ambiental das Lagoas dos Açores. *Sociedade & Território*: 35: 92-99.

Rodrigues, F. C. 1993. Hidrologia da Ilha Terceira (Contributo para o seu Conhecimento). Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores.

Rodrigues, F.C. 2002. Hidrogeologia da ilha Terceira (Açores – Portugal). Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.

UNESCO/WMO, 1992. Internatiol Glossary of Hydrology. Chapman & Hall, London.

UNL, 1991. O controlo da eutrofização nas Lagoas de S.Miguel-Açores. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

Vollenweider, R.A. 1968. Water Management Research; Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, Technical Report DAS/CSI/68.27, OCDE, Paris.

Wetzel R., 1993. Limnologia, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

# A modelação da qualidade da água como suporte ao ordenamento da albufeira de Castelo do Bode

## *Water quality modeling as a support for Castelo do Bode reservoir master plan development*

Pedro SANTOS COELHO<sup>1</sup>, Manuel ALMEIDA<sup>2</sup>, Ricardo REBELO<sup>3</sup>, Maria Felisbina QUADRADO<sup>4</sup>, Francisco RIBEIRO TELES<sup>5</sup>, João PÁDUA<sup>6</sup>

<sup>1</sup> FCT NOVA - DCEA, 2829-516 Costa de Caparica, pmhc@fct.unl.pt

<sup>2</sup> FCT NOVA - DCEA, 2829-516 Costa de Caparica, mcvt@fct.unl.pt

<sup>3</sup> FCT NOVA - DCEA, 2829-516 Costa de Caparica, r.rebelo@campus.fct.unl.pt

<sup>4</sup> APA, Rua da Murgueira, 9 - Zambujal – Alfragide, 2610-124 Amadora, maria.quadrado@apambiente.pt

<sup>5</sup> EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A., Av. 24 Julho 1249-300 Lisboa, francisco.telles@edp.com

<sup>6</sup> EDP Labelec - Estudos, Desenvolvimento e Atividades Laboratoriais, S.A., Rua Cidade de Goa, 4, 2685-038 Sacavém, joao.padua@edp.com

**RESUMO:** O processo de gestão da qualidade da água das albufeiras de águas protegidas localizadas em Portugal continental é, em grande parte, consubstanciado pela implementação das medidas inscritas nos principais instrumentos de gestão do território, nomeadamente os Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH) e os Planos de Ordenamento de Albufeiras (POA), actualmente designados Programas Especiais de Albufeiras de Águas Públicas (PEA), em função da adaptação dos POA ao quadro legislativo vigente. A definição das disposições gerais relativas ao uso e ocupação da área de intervenção, e de acções, medidas e projectos inscritos no POA da albufeira de Castelo do Bode (Resolução do Conselho de Ministros n.º 69/2003), foi parcialmente suportada pela modelação matemática da qualidade da água da albufeira (INAG, I.P., 2011a). Os cenários de simulação considerados permitiram identificar as principais pressões existentes e a mais-valia decorrente da aplicação de medidas concretas que visavam a redução da carga poluente afluente à massa de água. Decorridos 17 anos, e no âmbito do desenvolvimento do Programa Especial da Albufeira de Castelo do Bode (PEACB), procedeu-se a um novo processo de modelação matemática da qualidade da água. No presente estudo, descreve-se a abordagem metodológica que consubstanciou o processo de modelação matemática, os resultados obtidos e analisa-se a evolução da qualidade da água da albufeira nos últimos nove anos. Apesar da dificuldade inerente ao estabelecimento de uma relação causal directa entre a implementação das medidas/acções definidas no POA das albufeiras de Castelo do Bode, Cabril, Bouçã e Santa Luzia (Resolução do Conselho de Ministros n.º 45/2002), e a melhoria da qualidade da água da albufeira de Castelo do Bode, considera-se que, em função do nexo temporal existente, a redução de carga afluente determinada pela implementação das referidas medidas/acções, poderá ter tido um papel crucial na melhoria e preservação da qualidade da água da albufeira.

**Palavras-Chave:** Qualidade da água; Plano; Ordenamento; Modelação matemática; Castelo do Bode.

**ABSTRACT:** The water quality management process of protected reservoirs located in mainland Portugal is, to a large extent, supported by the implementation of the measures included in the main water management instruments, namely the Hydrographic Region Management Plans (HRMP) and the Reservoir Master Plans (RMP), currently called Special Public Water Reservoir Programs (SPWRP), due to the adaptation of the RMP to the current legislative framework. The definition of the general provisions related to the use and occupation of the intervention area, and of actions, measures and projects included in the RMP of the Castelo do Bode reservoir (Resolution of the Council of Ministers n.º 69/2003), was partially supported by the water quality modeling of Castelo do Bode reservoir (INAG, IP, 2011a). The simulation scenarios considered allowed the identification of the main pressures and the benefit resulting from the application of concrete measures aimed at reducing the polluting load affluent to the waterbody. After 17 years, and within the scope of the development of the Special Program of Castelo do Bode Reservoir (SPCBBR), a new water quality modeling study was carried out. In the present study, the methodological approach that supported the mathematical modeling process is described, the results obtained and the evolution of the water quality in the reservoir in the last nine years is analyzed. Despite the difficulty in establishing a direct causal relationship between the implementation of the measures/actions defined in the RMP of Castelo do Bode, Cabril, Bouçã and Santa Luzia reservoirs (Resolution of the Council of Ministers n.º 45/2002), and the observed water quality improvement in the Castelo do Bode reservoir, it is considered that, due to the existing temporal nexus, the reduction of affluent load determined by the implementation of the referred measures/actions, may have played a crucial role in the improvement and preservation of the reservoir water quality.

**Keywords:** Water quality; Plan; Management; Mathematical modeling; Castelo do Bode.

## 1. INTRODUÇÃO

A albufeira de Castelo do Bode é o principal reservatório nacional de água para abastecimento público, servindo mais de dois milhões de habitantes da área metropolitana de Lisboa e dos municípios limítrofes. De acordo com o Despacho n.º 5797/2018 de 12 de Junho, a experiência na aplicação do Plano de Ordenamento da Albufeira de Castelo do Bode (POACB), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 69/2003, de 10 de Maio, tem demonstrado um desajustamento da actual realidade socioeconómica e do presente quadro legal e institucional, que regula este tipo de instrumentos de gestão do território. Consequentemente, foi determinado no Despacho n.º 5797/2018, ao abrigo do artigo 46.º do Decreto-Lei n.º 80/2015, de 14 de Maio, a elaboração do Plano Especial da Albufeira de Castelo do Bode (PEACB). O presente estudo corresponde a uma síntese da componente de modelação matemática da qualidade da água da albufeira, contribuindo para se atingirem os objectivos que se pretendem com o desenvolvimento do PEACB. A análise realizada baseou-se, numa fase inicial, na avaliação da qualidade da água da albufeira entre o período temporal compreendido entre 2009 e 2017, enquadrada numa perspectiva histórica da evolução da qualidade da água da albufeira descrita em estudos anteriores (e.g.: INAG, I.P., 2011a; INAG, I.P., 2011b; EPAL, 2015). Posteriormente, procedeu-se à definição e simulação de diferentes cenários que visam, genericamente, quantificar as pressões existentes no que diz respeito às cargas poluentes afluentes à massa de água, bem como avaliar as vantagens decorrentes da sua eventual redução. Para o desenvolvimento dos estudos em análise, optou-se pela utilização do modelo bidimensional, CE-QUAL-W2, na sua versão 3.72 (COLE e WELLS, 2015).

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A construção do aproveitamento Hidroeléctrico de Castelo do Bode, localizado no rio Zêzere, afluente da margem direita do rio Tejo, gerou uma albufeira com uma capacidade total, ao nível de pleno armazenamento (NPA), de 1 095 hm<sup>3</sup> e uma área inundada de 3 500 ha. Neste mesmo rio estão construídos mais dois aproveitamentos de grande dimensão, ambos a montante de Castelo do Bode – Bouçã e Cabil. Este aproveitamento entrou em funcionamento em 1951, produzindo, anualmente e em média, 361 GWh decorrentes de uma potência total instalada de 159 MW.

## 3. METODOLOGIA

A abordagem metodológica considerada na análise realizada foi desenvolvida segundo duas perspectivas distintas. A análise da evolução da qualidade da água na albufeira de Castelo do Bode; e a definição e simulação matemática de diferentes cenários que conceptualizam a afluência de descargas poluentes à massa de água. Essas descargas podem ser pontuais, de origem doméstica ou industrial, ou difusas, quando a descarga poluente é transportada pelo escoamento superficial e gerada em áreas agrícolas, florestais ou pela actividade pecuária. Nas secções seguintes descreve-se resumidamente a metodologia adoptada.

### 3.1 Análise da evolução da qualidade da água na albufeira de Castelo do Bode

Pela sua importância, a albufeira de Castelo do Bode é, tal como outras albufeiras nacionais, alvo de um programa de monitorização desenvolvido pela EDP (EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. e Labelec - Estudos, Desenvolvimento e Actividades Laboratoriais, S.A.), no âmbito das obrigações contratuais enquanto utilizadora de recursos hídricos, que visa acompanhar a evolução da qualidade da água da albufeira, em função de critérios suportados na legislação vigente, e que permitem apoiar os processos de modelação da qualidade da água. Assim, tendo como base as séries de valores dos diferentes constituintes observados na albufeira, procedeu-se à sua análise entre os anos de 2009 e 2017.

### 3.2 Modelação matemática da qualidade da água da albufeira de Castelo do Bode

A componente de modelação matemática da qualidade da água suporta-se em dois vectores principais: a caracterização quantitativa das cargas poluentes afluentes à albufeira, decorrente do actual e do futuro uso do solo e das diferentes especificidades do mesmo na área de intervenção do PEACB, plano de água e zona terrestre de protecção, podendo esta coincidir com o âmbito territorial do PEACB (500 m) ou ser ajustada a uma largura máxima de 1000 m, contados a partir da linha de nível de pleno armazenamento (NPA) (Despacho n.º 5797/2018, de 12 de Junho); e a modelação dos vários processos associados aos diferentes parâmetros descritores da qualidade da água.

### 3.2.1 Modelo 2-D CE-QUAL-W2 v3.72

O modelo CE-QUAL-W2 permite a simulação hidrodinâmica e de qualidade da água de uma albufeira segundo as direcções longitudinal e vertical do sistema, sendo lateralmente homogéneo. É, por isso, indicado para o estudo de massas de água longas e estreitas, com gradientes longitudinais e verticais de qualidade da água (Cole e Wells, 2015). Assim, a albufeira em estudo foi simulada considerando a solução numérica, obtida com o algoritmo – ULTIMATE, incluído no modelo. A viscosidade/difusividade longitudinal de Eddy é resolvida pelo algoritmo W2N, tendo-se optado pela solução explícita do mesmo. A batimetria da albufeira de Castelo do Bode foi representada através do recurso a cartas topográficas (1:25 000), anteriores à construção da barragem e à criação da correspondente albufeira, nas quais foi possível identificar as curvas de nível que descrevem a batimetria da massa de água. O sistema foi dividido em 10 ramos, com um tributário correspondente à ribeira de Alge. Na Figura 1 pode observar-se a representação conceptual do sistema em análise.

### 3.2.2 Caracterização da situação de referência

Para o desenvolvimento dos estudos de simulação matemática da qualidade da água da albufeira de Castelo do Bode, consideraram-se os anos civis de 2011, 2012 e 2013 (correspondentes a ano médio, seco e húmido, respectivamente).

#### 3.2.2.1 Balanço de caudais e meteorologia

A determinação dos valores de caudal afluente e efluente do sistema, durante os anos civis de 2011 a 2013, realizou-se tendo como base os dados de autocontrolo disponibilizados pela EDP, que permitiram estabelecer um balanço de volumes entre os caudais descarregados, turbinados, caudais captados para diversos usos e a variação do volume armazenado na albufeira.

#### 3.2.2.2 Carga poluente afluente à massa de água

A caracterização da carga urbana gerada na bacia hidrográfica em análise, suportada por elementos disponibilizados pela APA, e parte integrante do PGRH Tejo e Ribeiras do Oeste (APA, 2016), compreende as cargas geradas pelos sistemas

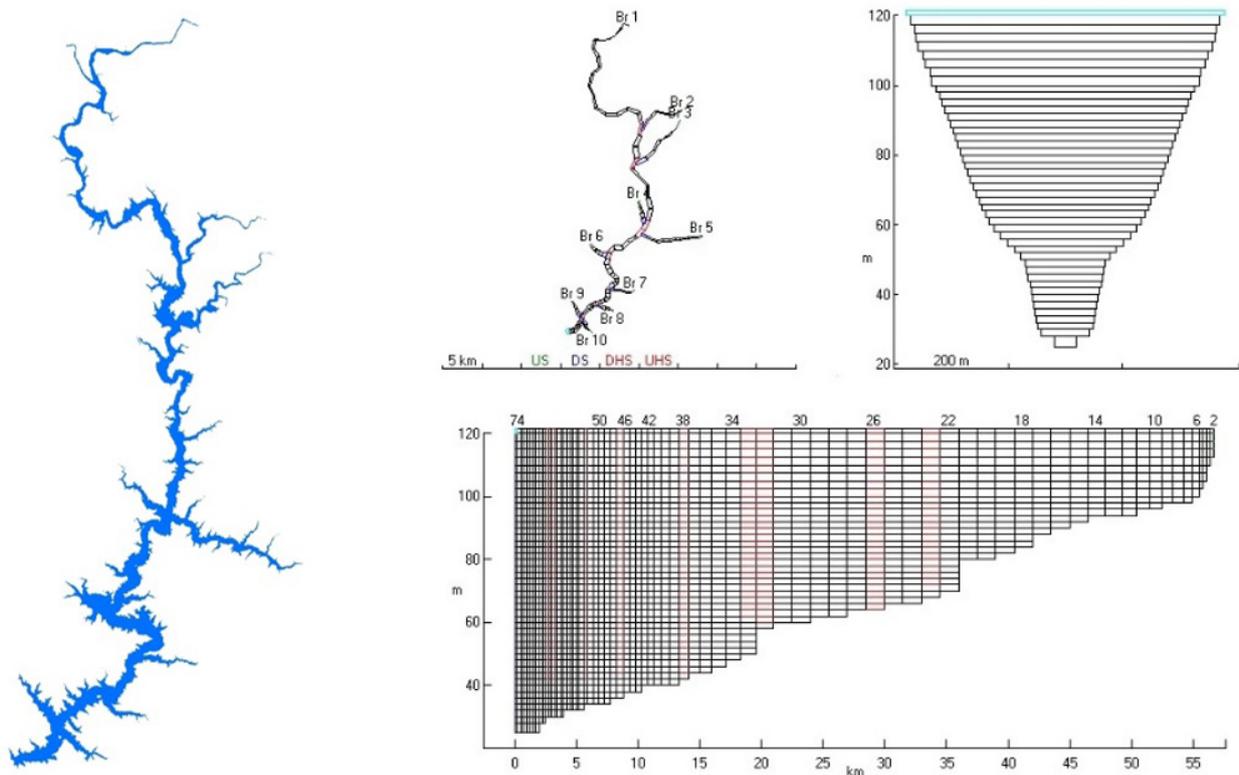


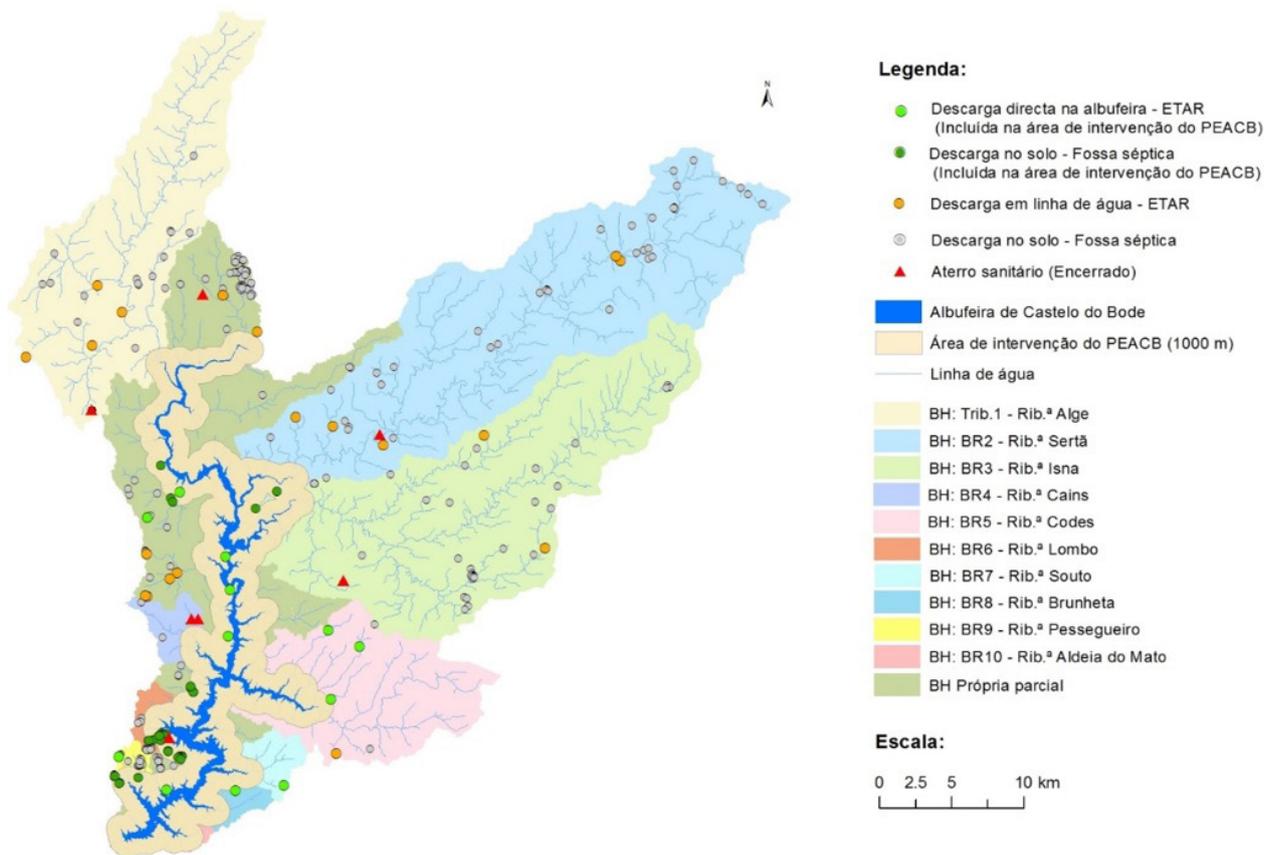
Figura 1. Representação conceptual da albufeira de Castelo do Bode.

de tratamento de águas residuais urbanas, pelas indústrias cujos efluentes são descarregados em massas de água e por águas residuais domésticas (fossas sépticas cujas descargas são efectuadas em poço ou trincheira de infiltração, ou seja, no solo). Tendo em consideração a caracterização das descargas poluentes, concluiu-se que existem onze fontes pontuais de poluição que descarregam directamente águas residuais para a área de intervenção do PEACB. Adicionalmente, na definição dos cenários de simulação incluíram-se mais 37 descargas, que apesar de serem realizadas no solo, como se localizam na área de intervenção do PEACB, podem, eventualmente, atingir a massa da água. A carga poluente de origem difusa, gerada pela actividade agrícola e pelas áreas florestais, foi estimada em função dos diferentes usos do solo associados à área de estudo, obtidos através da carta Corine Landcover 2012. Após a estimativa das cargas de azoto total (N total), fósforo total (P total) e da carência bioquímica de oxigénio (CBO<sub>5</sub>), geradas nas zonas com ocupação agro-florestal, determinou-se o valor da carga bruta de CBO<sub>5</sub> gerada pela pecuária, através das capitações de carga de CBO<sub>5</sub> por cabeça de gado. Posteriormente,

foi calculada a carga de N e de P gerada pela actividade pecuária, tendo sido utilizado como base o estudo desenvolvido em 2014 pela APA (APA, 2014). Finalmente, para se concluir a caracterização da situação de referência da massa de água, correspondente aos anos de 2011, 2012 e 2013, incluíram-se 16 tributários pontuais, que conceptualizam a afluência das descargas poluentes directas para a albufeira, às quais, no caso particular da albufeira de Castelo do Bode, acrescem as descargas no solo geradas por fossas sépticas que se localizam na área de intervenção do PEACB (Figura 2).

### 3.2.2.3 Cenários de simulação

A definição dos cenários de simulação, que implicam a redução e/ou incremento de carga poluente afluente à massa de água, foi realizada considerando que, nas áreas de drenagem que são dominadas por estações de monitorização de qualidade da água a contribuição das diferentes fontes de poluição é descrita pelos correspondentes resultados da monitorização. Desta forma, para possibilitar a análise e estudo de diferentes cenários, os dados



**Figura 2.** Localização das secções de descarga de águas residuais na bacia hidrográfica própria na albufeira de Castelo do Bode.

de qualidade que caracterizam as aflúncias ao sistema e que descrevem as descargas em análise, são afectados da percentagem de redução ou de incremento de carga, na proporção que caracteriza cada sector. Por outro lado, as descargas pontuais descritas pelos 16 tributários são afectadas da percentagem de remoção ou incremento de carga que é definida por cada um dos cenários de simulação (e.g.: a eficiência de tratamento da  $CBO_5$  correspondente à ETAR X evolui de 75% para 90%). Após o processo de calibração do modelo definiu-se e simulou-se um conjunto de cenários que visam avaliar as pressões determinadas pelas diferentes fontes de poluição (e.g.: agricultura e pecuária), bem como o efeito da melhoria da eficiência de remoção de  $CBO_5$ , N, P, coliformes fecais e totais de todas as ETAR urbanas e industriais existentes na bacia hidrográfica própria da albufeira de Castelo do Bode e na área de intervenção do plano (primário→secundário e secundário→terciário). Adicionalmente, avaliou-se o eventual efeito sobre a qualidade da água decorrente da implementação dos cenários *Minimalista*, *Business as Usual* e *Maximalista* definidos no PGRH Tejo e Ribeiros do Oeste, projectados para o ano de 2027 (APA, 2016). Finalmente, avaliou-se a capacidade de carga da albufeira de forma a garantir o Bom Potencial Ecológico e a minimizar o risco de eutrofização.

## 4. RESULTADOS

Nas secções seguintes descrevem-se as principais conclusões obtidas com a análise da evolução temporal da qualidade da água da albufeira e com a modelação da qualidade da água da albufeira de Castelo do Bode.

### 4.1 Análise da evolução da qualidade da água na albufeira de Castelo do Bode

O estudo desenvolvido em 2002 pelo INAG e pela FCT NOVA (DCEA) (INAG, I.P., 2011a), refere que entre 1996 e 2004, apesar de não se verificarem valores indicativos de uma degradação significativa do estado de qualidade da água, registou-se uma tendência de diminuição dessa qualidade na albufeira de Castelo do Bode. Não obstante, tendo em consideração a caracterização da qualidade da água desenvolvida pela EDP entre 2009 e 2017, conclui-se que a evolução temporal da qualidade da água da albufeira de Castelo do Bode, nomeadamente ao nível dos valores da concentração da  $CBO_5$ , P total e azoto amoniacal ( $NH_4$ ), evidencia um decréscimo importante dos valores da concentração destes parâmetros

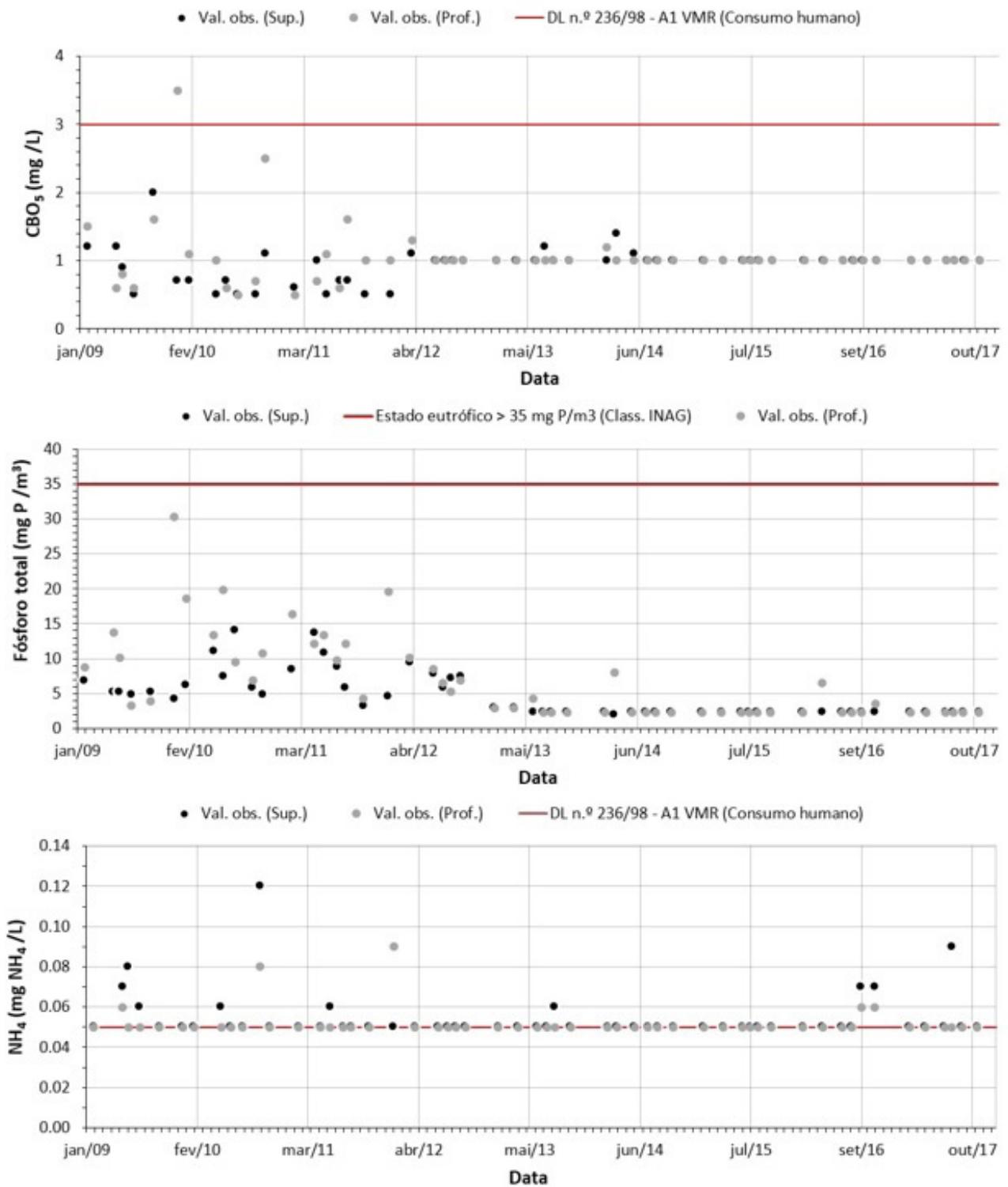
(Figura 3). A mesma conclusão é corroborada pela classificação da evolução do estado trófico em função dos critérios da OCDE (OCDE, 1982), nomeadamente no que concerne ao teor em fósforo, o factor limitante da produção primária deste sistema, que em 2015 e 2017 determinaria a classificação correspondente à ultra-oligotrofia.

### 4.2 Modelação da qualidade da água da albufeira de Castelo do Bode

#### 4.2.1 Evolução da carga poluente afluente à albufeira de Castelo do Bode no período temporal entre a aprovação do POACB e o actual período de desenvolvimento do PEACB

Uma das principais virtudes da modelação matemática da qualidade da água reside na possibilidade de se proceder à caracterização das condições de fronteira do modelo, face às cargas poluentes que afluem aos sistemas em estudo. Este processo é de uma relevância fundamental na medida em que expõe todas as fragilidades que estão associadas ao cadastro de recursos hídricos e, por inerência, ao próprio processo de Gestão de Recursos Hídricos. Neste contexto, considera-se que a eficácia dos instrumentos de gestão de recursos hídricos (e.g.: Plano Nacional da Água, Planos de Gestão de Região Hidrográfica, Planos de Ordenamento de Albufeiras) na redução das cargas poluentes que afluem às massas de água, deve ser avaliada de duas formas distintas. Através da monitorização da qualidade da água e da quantificação da variação das cargas poluentes que afluem aos sistemas, tendo em consideração o período temporal que antecede/precede a implementação das acções/medidas consideradas nesses planos.

Tendo em consideração o período temporal entre a aprovação do POACB e o actual período de desenvolvimento do PEACB, avaliou-se a carga bruta gerada na área de intervenção dos planos, nos dois momentos temporais. A área de intervenção do POACB e do PEACB (considerada ao nível do estudo de modelação da qualidade da água) tem uma dimensão de 500 m e de 1000 m, respectivamente, contados em projecção horizontal a partir da linha do NPA. À data da realização do POACB existiam na área de intervenção do Plano fossas sépticas que agregavam a carga gerada em 120 núcleos populacionais distribuídos por seis concelhos (Abrantes, Ferreira do Zêzere, Figueiró dos Vinhos, Tomar, Vila de Rei e Sertã), cuja carga bruta total é apresentada na Tabela 1. Com a implementação das



**Figura 3.** Valores da concentração de  $\text{CBO}_5$ , P total e  $\text{NH}_4$ , observados entre 2009 e 2017 na albufeira de Castelo do Bode a 300 m a montante da barragem de Castelo do Bode.

acções/medidas inscritas no POACB, que visavam a redução da carga poluente afluente à albufeira, a carga gerada, total ou parcialmente, por esses núcleos populacionais é actualmente tratada em 10 ETAR, que descarregam directamente para a albufeira. Destas 10 ETAR, cinco possuem tratamento mais avançado do que o secundário, quatro possuem tratamento secundário e uma possui tratamento primário (Tabela 1, PEACB <sup>(1)</sup>). Na área de intervenção do PEACB existem ainda 37 fossas sépticas individuais, cuja descarga é realizada na sua maioria em trincheiras (valas) de infiltração (APA 2016). Destas 37, 10 localizam-se na área de 500 m correspondente à área de intervenção do POACB. Assim, quando se compara a carga bruta gerada na área de intervenção do POACB (500 m) com a carga bruta gerada nos 1 000 m contados a partir do NPA da albufeira (PEACB), conclui-se que a mesma sofreu nos últimos 17 anos um incremento da carga da CBO<sub>5</sub>, P total e N total de, pelo menos, 13 %, 35 % e 13 %, respectivamente. Na ausência de informação adicional não foi possível identificar o motivo pelo qual o incremento da carga bruta de P total é percentualmente superior às restantes.

**Tabela 1.** Carga bruta da CBO<sub>5</sub>, P total e de N total gerada na área de intervenção do POACB e do PEACB.

Plano	CBO <sub>5</sub> , kg.ano <sup>-1</sup>	P total, kg.ano <sup>-1</sup>	N total, kg.ano <sup>-1</sup>
POACB	120 746	4 530	20 124
PEACB <sup>(1)</sup>	138 145	6 907	23 024
PEACB <sup>(2)</sup>	138 693	6 935	23 115
PEACB <sup>(3)</sup>	140 445	7 022	23 407

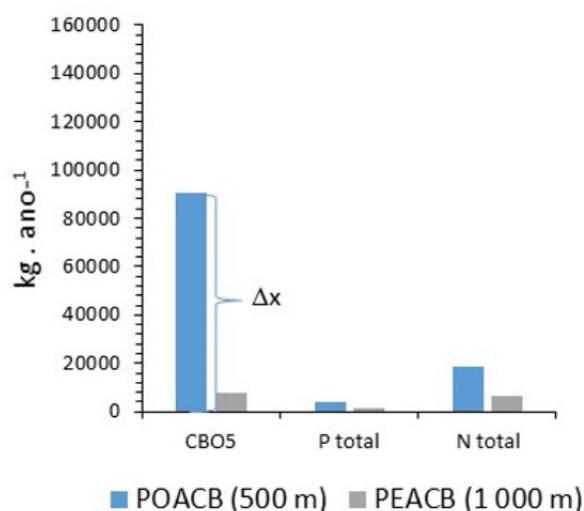
<sup>(1)</sup> carga bruta gerada por 10 ETAR que descarregam directamente na albufeira de Castelo do Bode

<sup>(2)</sup> carga bruta gerada por 10 ETAR que descarregam directamente na albufeira de Castelo do Bode e em 10 fossas sépticas que se encontram na área de 500 m em projecção horizontal contados a partir do NPA da albufeira

<sup>(3)</sup> carga bruta gerada por 10 ETAR que descarregam directamente na albufeira de Castelo do Bode e em 37 fossas sépticas que se encontram na área de intervenção do PEACB (1 000 m)

Por sua vez, na Figura 4 descreve-se a carga poluente de CBO<sub>5</sub>, P total e N total afluente à albufeira de Castelo do Bode após tratamento. No caso da carga gerada nas fossas sépticas consideradas ao nível do desenvolvimento do POACB, admitiu-se que esta estaria sujeita a um tratamento primário, ao qual estão associadas as seguintes eficiências de tratamento: CBO<sub>5</sub>: 25 %; P total: 11 %; N total: 9 % (DWA, 2000). Importa referir que a carga tratada nas fossas sépticas e, posteriormente, descarregada no solo, poderia não afluir totalmente à albufeira, pelo que a título de exemplo se associou, na Figura 4, a variável  $\Delta x$  associada à carga de CBO<sub>5</sub> passível

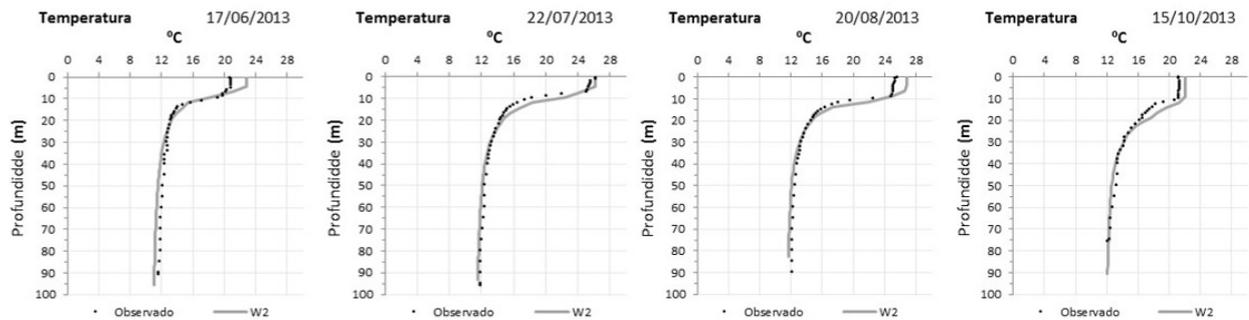
de atingir a massa de água. Por outro lado, a análise dos dados disponibilizados pela APA (APA, 2016) permitiu concluir que a eficiência média de tratamento associada aos sistemas de tratamento das descargas de água residuais existentes na actual área de intervenção do PEACB é de 95 %. Tendo em consideração o incremento da eficiência de tratamento das descargas de águas residuais existentes na área de intervenção do PEACB, conclui-se que essa eficiência pode ter tido uma influência considerável na melhoria da qualidade da água da albufeira, evidenciada anteriormente na secção 4.1 (vide Figura 3).



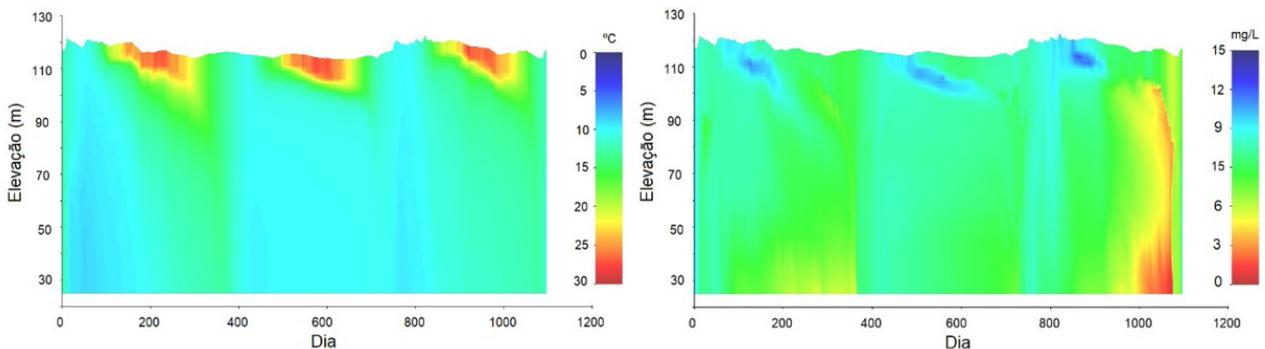
**Figura 4.** Carga afluente à albufeira de Castelo do Bode gerada na área de intervenção do POACB (500 m) e na área de 1 000 m considerada ao nível da modelação matemática desenvolvida no âmbito do PEACB.

#### 4.2.2 Calibração do modelo CE-QUAL-W2

O processo de calibração do modelo CE-QUAL-W2 para a simulação da albufeira de Castelo do Bode revelou-se de difícil concretização, fundamentalmente porque a caracterização das afluências não é a mais adequada, nomeadamente em termos da discretização temporal dos valores disponíveis. Não obstante, os resultados obtidos, nomeadamente ao nível da temperatura da água e do teor em oxigénio dissolvido, são suficientemente robustos para suportar a simulação dos diferentes cenários. O erro médio absoluto obtido para a temperatura da água e para o teor em OD, para os anos de 2011, 2012 e 2013 foi de, 0,93 °C e 0,74 mg/L, respectivamente (Figura 5 e Figura 6).



**Figura 5.** Perfis de temperatura da água observados a 300 m a montante da barragem de Castelo do Bode versus perfis obtidos com o modelo CE-QUAL-W2.



**Figura 6.** Evolução dos valores de temperatura da água (esquerda) e da concentração de OD (direita) ao longo da coluna de água e a 300 m a montante da barragem de Castelo do Bode (2011 a 2013).

#### 4.2.3 Cenários de simulação da qualidade da água

Os resultados obtidos com os diferentes cenários de simulação permitiram concluir que a carga que aflui à albufeira de Castelo do Bode é gerada maioritariamente a montante da barragem da Bouçã. Neste contexto, os resultados obtidos sugerem também que é relevante que se aprofunde o conhecimento existente sobre as eventuais fontes de fósforo, nomeadamente de ortofosfatos ( $P-PO_4$ ), existentes em toda a bacia hidrográfica dominada pela barragem de Castelo de Bode, e sobre o ciclo de vida deste parâmetro nas albufeiras de Cabril e da Bouçã. Importa igualmente estudar o processo de transporte de matéria orgânica neste sistema, uma vez que, de acordo com os resultados obtidos, ainda para a situação de referência deste estudo, o período durante o qual os valores da concentração de OD são mais reduzidos surge durante o ano húmido considerado na análise, 2013, indiciando que há um incremento da carga de matéria orgânica transportada pelo escoamento superficial. Esta situação determinou uma diminuição dos valores de OD superior à que ocorre durante o ano seco de 2012, que é descrita pelos perfis de OD observados

na albufeira. Por outro lado, os resultados obtidos indicam que o impacto da redução ou incremento da carga afluente à albufeira é, de uma forma geral, mais significativo durante o ano seco de 2012. Adicionalmente, quando se consideram os cenários de simulação definidos com o objectivo de se avaliar a influência da carga gerada na bacia hidrográfica própria da albufeira e, em particular, na área de intervenção do PEACB, os resultados obtidos sugerem que:

- i. A pressão exercida pelas descargas poluentes de origem urbana e industrial geradas na bacia hidrográfica própria da albufeira de Castelo do Bode é reduzida, e o incremento da eficiência de tratamento das águas residuais, com a excepção da redução da carga poluente determinada pelo hipotético tratamento terciário de todas as descargas existente na bacia hidrográfica própria da albufeira, e incluindo as descargas realizadas na área de intervenção do PEACB, teria um efeito pouco sensível sobre a qualidade da água da albufeira;

- ii. As descargas que ocorrem no solo da bacia hidrográfica própria da albufeira de Castelo do Bode, geradas maioritariamente em fossas sépticas, se atingissem a massa de água, teriam igualmente um impacto reduzido sobre a qualidade da água da mesma;
- iii. A redução da carga de P-PO<sub>4</sub>, de nitratos + nitritos (N-NO<sub>x</sub>) e da CBO<sub>5</sub>, gerada pelo sector da pecuária e nas áreas agrícolas e florestais existentes na bacia hidrográfica própria da albufeira de Castelo do Bode, poderá determinar melhorias significativas na correspondente qualidade da água;
- iv. A implementação do cenário prospectivo *Minimalista*, definido no PGRH Tejo e Ribeiras do Oeste, pode ter um impacto com alguma relevância na qualidade da água da albufeira, em particular sobre o teor em biomassa algal, resultante da redução dos valores da concentração de P-PO<sub>4</sub> (o factor limitante da produção primária).

No que concerne à estimativa da capacidade de carga da albufeira de Castelo do Bode, os resultados obtidos com o exercício de simulação sugerem que a albufeira não deverá receber mais de 29 kg P-PO<sub>4</sub>/dia<sup>-1</sup>, 2 683 kg N-NO<sub>x</sub>/dia<sup>-1</sup> e de 19 809 kg CBO<sub>5</sub>/dia<sup>-1</sup>.

## 5. CONCLUSÕES

Não obstante a dificuldade inerente ao estabelecimento de uma relação causa-efeito entre a implementação das medidas/acções definidas no POA das albufeiras de Castelo do Bode, Cabril, Bouçã e Santa Luzia (Resolução do Concelho de Ministros n.º 45/2002), e a melhoria da qualidade da água da albufeira de Castelo do Bode, considera-se que, em função do nexos temporal existente, a redução de carga poluente afluente determinada pela implementação das correspondentes medidas/acções, poderá ter tido um papel crucial na melhoria e preservação da qualidade da massa de água. Também as medidas que têm vindo a ser implementadas em toda a bacia de drenagem destas albufeiras, ao abrigo dos programas de medidas definidos nos PGRH do 1º ciclo e 2º ciclo, terão contribuído para esta melhoria. A importante redução dos valores da concentração de P total, evidenciada pela classificação ultra-oligótrofica da albufeira, para os anos de 2015 e 2017, constitui um indicador relevante relativamente ao potencial ecológico da massa de água, nomeadamente no que diz respeito à diminuição da produção primária da mesma. Numa avaliação global, concluiu-se que as concentrações de fósforo, azoto e de CBO<sub>5</sub>

na albufeira de Castelo do Bode são, todas elas, inferiores ao limite definido para o Bom Potencial Ecológico. A pressão exercida pelas descargas poluentes, de origem urbana e industrial, geradas na bacia hidrográfica própria da albufeira de Castelo do Bode é reduzida, e o incremento da eficiência de tratamento das águas residuais, com a excepção da redução da carga poluente determinada pelo hipotético tratamento terciário de todas as descargas existentes na bacia hidrográfica própria da albufeira, e incluindo as descargas realizadas na área de intervenção do PEACB, teria um efeito pouco sensível sobre a qualidade da água da albufeira. No entanto, importa referir que a redução da carga de P-PO<sub>4</sub>, de N-NO<sub>x</sub> e de CBO<sub>5</sub>, gerada pelo sector da pecuária e nas áreas agrícolas e florestais existentes na bacia hidrográfica própria da albufeira de Castelo do Bode, poderia determinar melhorias significativas na correspondente qualidade da água. Adicionalmente, considera-se que a implementação do cenário prospectivo *Minimalista*, definido no PGRH Tejo e Ribeiras do Oeste, pode ter um impacto com alguma relevância na qualidade da água da albufeira. Finalmente, em função da análise realizada, considera-se que a albufeira de Castelo do Bode não deverá receber mais de 29 kg P-PO<sub>4</sub>/dia, 2 683 kg N-NO<sub>x</sub>/dia e de 19 809 kg CBO<sub>5</sub>/dia. Finalmente, importa destacar a importância do processo de atribuição de títulos de utilização de recursos hídricos e, conseqüentemente, da estimativa da carga poluente afluente à massa de água em estudo. Neste contexto, e em função das características específicas da albufeira de Castelo do Bode, recomenda-se às diferentes partes interessadas a melhoria do sistema de monitorização da qualidade da água e da rede meteorológica, bem como a actualização periódica do processo de simulação descrito no presente estudo. Adicionalmente, considera-se relevante que haja algum investimento em estudos científicos que permitam estimar taxas de exportação da CBO<sub>5</sub>, P e N, geradas pelas diferentes fontes de poluição.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à APA e à EDP por todo o apoio prestado, nomeadamente, no que se refere à disponibilização dos dados de base que permitiram o desenvolvimento deste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA - Avaliação das cargas de poluição difusa geradas em Portugal Continental. Agência Portuguesa do Ambiente, 2014.

APA - Plano de Gestão de Região Hidrográfica – Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5). Agência Portuguesa do Ambiente, 2016.

Cole, T. M. e Wells, S. A. - CE-QUAL-W2. A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.72 User manual. Instruction Report E-95-1, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 2015.

EPAL - Avaliação do Risco de Poluição das Origens Superficiais de Castelo do Bode e de Valada do Ribatejo – Contribuição para o Plano de Segurança da Água da EPAL, 2015.

DWA - ATV-DVWK-A 131E, Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. German Association for Water, Wastewater and Waste. Publicado: DWA, 2000.

INAG, I.P. - Modelação Matemática da Qualidade da Água em Albufeiras com Planos de Ordenamento – I – Albufeira de Castelo do Bode. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território. Instituto da Água, I.P, 2011 a).

INAG, I.P. - Modelação Matemática da Qualidade da Água em Albufeiras com Planos de Ordenamento – II – Albufeira de Castelo do Bode - Impacto da navegação recreativa a motor. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território. Instituto da Água, I.P., 2011 b).

OCDE, Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico - Eutrophication of Waters – Monitoring Assessment and Control. OECD (ed.), Paris. 1982, 125 pp.

## LEGISLAÇÃO

Decreto-Lei n.º 80/2015, de 14 de Maio

Despacho n.º 5797/2018, de 12 de Junho

Resolução do Conselho de Ministros n.º 69/2003 de 10 de Maio

Resolução do Conselho de Ministros n.º 45/2002 de 13 de Março

# NORMAS PARA SUBMISSÃO DE ARTIGOS

Os autores interessados em publicar artigos científico-técnicos ou discussões de artigos anteriormente publicados na revista Recursos Hídricos deverão respeitar as seguintes normas:

1. O artigo, necessariamente original e preferencialmente redigido em Português, na forma impessoal, tem de ser entregue em suporte informático. O processador de texto a utilizar deverá ser o Word (Microsoft). São também aceites artigos redigidos em Inglês.
2. O título, o nome do(s) autor(es) e o texto do artigo (incluindo quadros e figuras) devem ser compostos e guardados num ficheiro único, devidamente identificado (por exemplo, artigo.doc). Tal ficheiro tem de conter a indicação, de forma clara, das zonas onde se pretendem inserir as figuras, desenhos ou fotografias. O texto do artigo deve ser corrido a uma coluna, com espaçamento normal e com a extensão máxima de quarenta mil caracteres (incluindo espaços).
3. O título do artigo tem de ser redigido em Português e em Inglês.
4. A seguir ao título deve ser indicado o nome do(s) autor(es) e um máximo de três referências aos seus graus académicos ou cargos profissionais, assim como o número de associado, caso seja membro da APRH.
5. O corpo do artigo tem de ser antecedido do resumo, redigido em Português e em Inglês (abstract). O resumo em qualquer um dos anteriores idiomas não deve exceder dois mil e quinhentos caracteres (incluindo espaços).
6. Os elementos gráficos (figuras, desenhos e fotografias) têm também de ser fornecidos separadamente em suporte informático, num único ficheiro ou em ficheiros individuais, mas sempre devidamente identificados (por exemplo, Figuras.doc, Figura1.jpg, etc.). Não existe qualquer restrição quanto à utilização de cor naqueles elementos.
7. As referências bibliográficas no corpo do texto devem ser feitas de acordo com a norma portuguesa NP-405 de 1996, indicando o nome do autor (sem iniciais) seguido do ano de publicação entre parêntesis. No caso de mais de uma referência relativa ao mesmo autor e ao mesmo ano, devem ser usados sufixos a), b), etc.
8. Os artigos devem terminar por uma lista de referências bibliográficas organizada por ordem alfabética do nome (apelido) do primeiro autor, seguido dos nomes dos outros autores, caso os haja, do título da obra, editor, local e ano de publicação (ou referência completa da revista em que foi publicada). De tal lista só podem constar as referências bibliográficas efectivamente citadas no corpo do texto.
9. Só serão aceites discussões de artigos publicados até dois meses após a publicação do número da revista onde esse artigo se insere. As discussões serão enviadas ao autor do artigo, o qual poderá responder sob a forma de réplica. Discussões e réplica, caso exista, serão, tanto quanto possível, publicados conjuntamente.
10. O título das discussões e da réplica por elas originada é o mesmo do artigo original acrescido da indicação Discussão ou Réplica. Seguidamente, deve constar o nome do autor da discussão ou da réplica de acordo com o indicado no ponto 4.
11. À publicação de discussões e de réplicas aplicam-se as normas antes explicitadas para a publicação de artigos
12. Os artigos e as discussões devem ser enviados por correio electrónico para o endereço da APRH (aprh@aprh.pt). O assunto desse correio electrónico deve elucidar sobre o respectivo conteúdo (por exemplo, submissão de artigo ou discussão de artigo). No corpo do correio, o autor ou os autores têm ainda de sugerir três revisores que considerem adequados, face ao teor científico técnico e ao idioma do respectivo artigo.

Secretariado da APRH  
A/c LNEC – Av. do Brasil, 101  
1700-066 Lisboa  
Portugal

