Coordenadores:
Adélia Nunes
Luciano Lourenço

Análise e modelação de risco no ordenamento do território

RISCOS
Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança
Coimbra, 2023

Análise e modelação de risco no ordenamento do território, o décimo primeiro volume da série ***Estudos Cindínicos***, é constituído por seis capítulos que têm como denominador comum a análise e a modelação de riscos (hidrológicos, geomorfológicos, climáticos/meteorológicos) como ferramentas indispensáveis no ordenamento do território, na redução do risco de desastre e no fortalecimento da resiliência ambiental e social.

Tendo o ordenamento do território como finalidade acautelar a proteção da população e bens, através de uma ocupação, utilização e transformação do solo que tenham em conta a segurança de pessoas, prevenindo riscos coletivos e reduzindo os seus impactes nas pessoas e ecossistemas, torna-se imperioso conhecê-lo para que as que decisões que venham a ser tomadas sejam informadas e eficientes.

Neste contexto, a análise e modelação da informação geográfica, quantitativa ou qualitativa, permite o conhecimento mais detalhado do território. Embora a modelação geográfica implique sempre uma simplificação da realidade, tornando-a manipulável, os resultados obtidos permitem uma aproximação à previsão do comportamento do território e dos fenómenos nele desenvolvidos, bem como dos agentes que intervêm no mesmo. Assume, assim, grande relevância na gestão e ordenamento do território, bem como ferramenta para a tomada de decisões sobre oportunidades, condicionantes, prevenção e mitigação de riscos.

Trata-se, sem dúvida, de um livro de elevada utilidade para investigadores, decisores públicos, professores e estudantes, com interesse nestas matérias ou com responsabilidade na análise e gestão dos riscos e no ordenamento do território.

Adélia Nunes

Professora Associada, com Agregação em Geografia, na Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra

RISCOS
ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
DE RISCOS, PREVENÇÃO
E SEGURANÇA

Estruturas Editoriais | Editorial Structures
Estudos Cindínicos

Diretor Principal | Main Editor
Luciano Lourenço
RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

Diretores Adjuntos | Assistant Editors
António Amaro, Adélia Nunes, António Vieira, Fátima Velez de Castro
RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

Assistente Editorial | Editoral Assistant
Fernando Félix
RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

Comissão Científica | Editorial Board

Adélia Nunes
Universidade de Coimbra

Ana Meira Castro
Instituto Superior de Engenharia do Porto

António Betâmio de Almeida
Instituto Superior Técnico, Lisboa

António Duarte Amaro
Universidade Nova de Lisboa

António Vieira
Universidade do Minho

Bruno Martins
Universidade de Coimbra

Cristona Queirós
Universidade do Porto

Fátima Velez de Castro
Universidade de Coimbra

Helena Fernandez
Universidade do Algarve

Humberto Varum
Universidade de Aveiro

João Luís Fernandes
Universidade de Coimbra

José Simão Antunes do Carmo
Universidade de Coimbra

Luciano Lourenço
Universidade de Coimbra

Romero Bandeira
Inst. de Ciências Biomédicas Abel Salazar, Porto

Tomás de Figueiredo
Instituto Politécnico de Bragança

Antenora Maria da Mata Siqueira
Universidade Federal Fluminense, Brasil

Antonio Carlos Vitte
Universidade Estadual de Campinas, Brasil

Carla Juscélia Oliveira Souza
Universidade de São João del Rei, Brasil

Jorge Olcina Cantos
Universidade de Alicante, Espanha

José Arnaez Vadillo
Universidade de La Rioja, Espanha

Lidia Esther Romero Martín
Universidade Las Palmas de Gran Canaria, Espanha

María Augusta Fernández Moreno
Universidade Católica de Ibarra, Equador

Miguel Castillo Soto
Universidade do Chile

Monserrat Díaz-Raviña
Inst. Inv. Agrobiológicas de Galicia, Espanha

Norma Valencio
Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Tiago Ferreira
University of the West of England

Virginia Araceli García Acosta
CIESAS, México

Xavier Ubeda Cartañà
Universidade de Barcelona, Espanha

Yolanda Teresa Hernández Peña
Univ. Distrital Francisco José de Caldas, Colômbia

Yvette Veyret
Universidade de Paris X, França

ADÉLIA NUNES
LUCIANO LOURENÇO
(COORDS.)

estudos CINDÍNICOS

ANÁLISE E MODELAÇÃO DE RISCO NO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Edição
RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança
Email: riscos@riscos.pt
URL: https://www.riscos.pt/publicacoes/sec/

Obra sujeita ao processo de revisão por pares

Coordenação Editorial
Adélia Nunes e Luciano Lourenço

Imagem da Capa
Karine Nieman

Paginação
Fernando Félix

Edição Gráfica
Fernando Félix

ISSN
2184-5727

DOI (Série)
https://doi.org/10.34037/978-989-54295-1-6

ISBN Digital
978-989-9053-18-2

DOI
https://doi.org/10.34037/978-989-9053-18-2_11

©Julho de 2023, RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

SUMÁRIO

PREFÁCIO 9

A importância dos modelos numéricos na previsão dos efeitos das alterações climáticas e dos eventos extremos em áreas estuarinas
Isabel Iglesias, José Luís Pinho, Ana Bio, Paulo Avilez-Valente, Willian Melo, José Vieira, Luísa Bastos e Fernando Veloso-Gomes 13

Áreas sujeitas a inundação e alagamento na cidade de Maricá, RJ - Brasil
Alessandra Conde de Freitas, Fabíola de Souza Freitas e Lidiane dos Santos Lima 45

Aplicação do modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND) para mapeamento de inundação na bacia hidrográfica do rio Cuiá, João Pessoa, Paraíba, Brasil
Maria Luisa Palitot Remígio Alves, Hamilcar José Almeida Filgueira e Jessé Pedro Gomes Júnior 83

Índice para avaliação de áreas sujeitas a risco de movimentos em massa
Thyago Anthony Soares Lima, Fernando Granja-Martins e Helena Fernandez 111

O fator LS (EUPS) aplicado ao ordenamento do território para delimitação da Reserva Ecológica Nacional (REN)
António Alves da Silva e Fernando Lagos Costa 151

Contributos para a análise de riscos em ambientes condicionados pelo ar húmido – estudos de caso
Mário Talaia 193

PREFÁCIO

Análise e modelação de risco no ordenamento do território é o tema do décimo primeiro volume da série ***Estudos Cindínicos***, lançada em 2018, a qual pretende compilar contributos diversos, provenientes tanto de autores de diferentes nacionalidades, cujas realidades estão sujeitas a vários tipos e graus de riscos, como de distintas áreas de investigação, cobrindo assim uma vasta diversidade de regiões e de temas, dentro das ciências cindínicas.

O ordenamento do território tem como fim acautelar a proteção da população, através de uma ocupação, utilização e transformação do solo que tenham em conta a segurança de pessoas, prevenindo riscos coletivos e reduzindo os seus efeitos nas pessoas e bens e, desta forma, aumentando a resiliência do território aos impactes decorrentes de manifestação de processos potencialmente perigosos. O território, por sua vez, constitui-se como um domínio complexo resultante da interação e influência de diversos elementos, também eles de elevada complexidade, os quais influenciam e condicionam a sua gestão e utilização. Como tal é imperioso conhecê-lo para que as que decisões que venham a ser tomadas sejam informadas e eficientes.

Neste contexto, a análise da informação geográfica, quantitativa ou qualitativa, permite o conhecimento mais detalhado desse território. Embora a modelação geográfica implique sempre uma simplificação da realidade, tornando-a manipulável, os resultados obtidos permitem uma aproximação à previsão do comportamento do território e dos fenómenos nele desenvolvidos, bem como dos agentes que intervêm no mesmo. Assume, assim, grande relevância na gestão e ordenamento do território, bem como ferramenta para a tomada de decisões sobre oportunidades, condicionantes, prevenção e mitigação de riscos.

Este volume, que agora dá à estampa, é constituído por seis capítulos que têm como denominador comum a análise e a modelação de riscos (hidrológicos, geomorfológicos, climáticos/meteorológicos) como ferramentas indispensáveis no ordenamento do território, na redução do risco de desastre e no fortalecimento da resiliência ambiental e social.

No primeiro capítulo, da autoria de Isabel Iglesias, José Luís Pinho, Ana Bio, Paulo Avilez-Valente, Willian Melo, José Vieira, Luísa Bastos e Fernando

Veloso-Gomes, intitulado "*A importância dos modelos numéricos na previsão dos efeitos das alterações climáticas e dos eventos extremos em áreas estuarinas*" analisa-se a hidrodinâmica estuarina do Douro e do Minho, como o intuito de reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência dos estuários. Para o efeito, combinaram diferentes modelos, considerando diversos cenários, atuais e futuros, fluxos de cheia e valores extremos do nível do mar segundo as projeções dos RCPs do IPCC. Os resultados obtidos fornecem informações essenciais para o desenvolvimento de protocolos e estratégias de mitigação, para proteger os recursos naturais, populações e infraestruturas costeiras, mais bem-adaptadas a eventos extremos futuros e às condições de alterações climáticas.

Alessandra Conde de Freitas, Fabíola de Souza Freitas e Lidiane dos Santos Lima são os autores do segundo capítulo, o qual tem como principal objetivo localizar as "*Áreas sujeitas a inundação e alagamento na cidade de Maricá, RJ – Brasil*", recorrendo a metodologias diversas. Assim, das 32 localidades avaliadas, 5 foram afetadas por inundações, 15 por alagamentos e 12 foram afetadas por inundações e alagamentos, sendo esses processos típicos de regiões de média a alta suscetibilidade. Com efeito, esta cidade costeira do estado do Rio de Janeiro, Brasil, assinalou, nas últimas décadas, um crescimento populacional urbano significativo, potencializando a ocorrência de desastres hidrológicos. Os Autores são perentórios ao afirmar que os resultados obtidos através deste trabalho permitiram "[...] *verificar que fatores como urbanização, planejamento urbano, mudanças nos usos da terra, gerenciamento dos recursos naturais (por exemplo, água) e ações educativas, podem afetar a abrangência, frequência e a severidade de desastres associados a inundações e alagamentos, em termos de perdas de vidas, prejuízos econômicos e impactos no meio ambiente*".

O terceiro capítulo, com o título "*Aplicação do modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND) para mapeamento de inundação na bacia hidrográfica do rio Cuiá*", é da autoria de João Pessoa, Maria Luisa Palitot Remígio Alves, Hamilcar José Almeida Filgueira e Jessé Pedro Gomes Júnior. Tem como objetivo cartografar episódios de inundação numa secção da Bacia Hidrográfica do rio Cuiá, utilizando o modelo descritor de terreno *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), antes e após a realização de desassoreamento no leito do rio. Para o efeito, obtiveram fotografias métricas que permitiram a realização de um Modelo Digital de Terreno

(MDT), com resolução espacial de 0,30 m. Os resultados obtidos, de acordo com o modelo HAND, mostraram que o desassoreamento reduziu em 50,8% o número de casas suscetíveis a inundação e em 31,5% a área total afetada pelas cheias. Apesar da intervenção no leito do rio poder ser considerada de eficiente, na minimização dos problemas relacionados com as inundações na área de estudo, os Autores classificam esta dragagem como uma medida paliativa, podendo ser classificada como uma prática agressiva ao rio.

O capítulo da autoria de Thyago Anthony Soares Lima, Fernando Granja-Martins e Helena Fernandez, com o título "*Índice para avaliação de áreas sujeitas a risco de movimentos em massa*" propõe-se apresentar um índice de risco de movimentos em massa, à escala regional, tendo sido aplicado à cidade de Maceió, Alagoas, Brasil, muito suscetível à manifestação deste risco. Na equação para o cálculo do Índice de Movimentos em Massa (IMM) consideraram duas componentes; a primeira inclui sete fatores de perigosidade (Litologia, Unidades do Relevo, Pedologia, Declive, Precipitação, Vegetação e o Uso e Ocupação do Solo) e a segunda o fator da vulnerabilidade (Densidade Demográfica e a Situação da Moradia e os Registos de Ocorrências). Os resultados obtidos mostram a existência de áreas muito suscetíveis à ocorrência de movimentos em massa, sendo que a elevada densidade demográfica dos bairros e a má qualidade de construção contribuem para o incremento da vulnerabilidade da população residente.

"O fator LS (EUPS) aplicado ao ordenamento do território para delimitação da Reserva Ecológica Nacional (REN)" é o título do quarto capítulo, de António Alves da Silva e Fernando Lagos Costa. Neste trabalho de investigação, os Autores visam definir os limites da Reserva Ecológica Nacional (REN) a nível municipal, tendo por base as Áreas de Elevado Risco de Erosão Hídrica do Solo (AEREHS), definidas pela Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) Revista (RUSLE), de acordo com a legislação em vigor. Para o efeito, compararam os resultados da aplicação de métodos e variantes de cálculo do fator topográfico LS na perda potencial de solo em contextos geomorfológicos variáveis, no intuito de optar por uma solução genérica mais adequada. Os resultados obtidos sugerem que a versão 2 da RUSLE (RUSLE2), que limita o comprimento do escoamento não organizado a 305 m (máximo previsto pelos autores da EUPS), é a mais adequada ao cálculo do LS e delimitação das AEREHS no

âmbito da REN. Consideram os Autores, ainda, que esta versão da RUSLE se adapta melhor a regiões em que a erosão hídrica se concentra no inverno, discriminando as áreas de escoamento em toalha de sulcagem, consoante o declive. Reforçam, todavia, a necessidade de diferenciar contextos geomorfológicos em cada município, pois o método usado e sobretudo a cartografia de base afetam os resultados, com impactos substanciais na demarcação da REN.

Mário Talaia é o Autor do último capítulo deste livro, com o tema "*Contributos para a análise de riscos em ambientes condicionados pelo ar húmido – estudos de caso*", no qual são explorados ambientes que podem gerar riscos para a saúde pública, nomeadamente ambiente térmico, mobilidade de vírus no ar húmido, riscos de saúde num incêndio florestal e riscos de saúde num mergulho em apneia. A análise deste tipo de risco assume particular relevância com a problemática das alterações climáticas, do aquecimento global e em cenários de novos ecossistemas. O Autor, com base em diferentes cenários, com risco para a saúde humana apresentou leis físicas e/ou químicas de modo a serem geradas expressões ou modelos simples para a interpretação dos estudos de caso considerados. Propôs ainda, para cada estudo de caso, estratégias de intervenção de modo a estabelecer limiares de segurança e manter limites de tolerância.

Trata-se, sem dúvida, de um livro de elevada utilidade para investigadores, decisores públicos, professores e estudantes, com interesse nestas matérias ou com responsabilidade na análise e gestão dos riscos e no ordenamento do território. A expectativa é a de que, com o envolvimento e articulação de todos, se possa gerir o território de modo reduzir os riscos e aumentar capacidade de antecipação e mitigação dos danos, através de comunidades e ecossistemas mais resilientes.

Coimbra, 12 de julho de 2023

Adélia Nunes

A IMPORTÂNCIA DOS MODELOS NUMÉRICOS NA PREVISÃO DOS EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E DOS EVENTOS EXTREMOS EM ÁREAS ESTUARINAS

THE IMPORTANCE OF NUMERICAL MODELS IN FORECASTING CLIMATE CHANGE AND EXTREME EVENTS EFFECTS IN ESTUARINE AREAS

Isabel Iglesias* 0000-0002-4900-135X iiglesias@ciimar.up.pt

José Luís Pinho ** 0000-0003-2070-8009 jpinho@civil.uminho.pt

Ana Bio* 0000-0003-4501-9410 anabio@ciimar.up.pt

Paulo Avilez-Valente* *** 0000-0002-2562-6603 pvalente@fe.up.pt

Willian Melo ** 0000-0002-3514-4229 willianwm94@gmail.com

José Vieira ** 0000-0001-8982-7597 jvieira@civil.uminho.pt

Luísa Bastos* ****** 0000-0001-7517-0707 lcbastos@fe.up.pt

**Fernando Veloso-Gomes* ** 0000-0002-0258-0171 vgomes@fe.up.pt

*CIIMAR - Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Univ. do Porto

** CTAC - Centro do Território Ambiente e Construção, Dep. de Engenharia Civil, Universidade do Minho (Portugal)

*** FEUP - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto (Portugal)

**** Dep. de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, FCUP - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto (Portugal)

Resumo: O conhecimento pormenorizado da hidrodinâmica estuarina é fulcral para a tomada de medidas que permitam reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência dos estuários. Os modelos numéricos podem desempenhar um papel fundamental no apoio à decisão, mas para tal é necessário que produzam resultados fiáveis. Com esse objetivo é proposta a técnica dos *ensembles*, que permite combinar os resultados de diferentes modelos. Este é o principal objetivo do projeto

DOI: https://doi.org/10.34037/978-989-9053-18-2_11_1

EsCo-Ensembles, no qual foram desenvolvidos dois modelos numéricos diferentes aplicados nos estuários do Douro e do Minho e para os quais foram desenhados diversos cenários, considerando estados atuais e futuros, fluxos de cheia e valores extremos do nível do mar segundo as projeções dos RCPs do IPCC.

É esperado que os resultados deste projeto forneçam uma caracterização hidromorfodinâmica completa das áreas estuarinas consideradas, permitindo avaliar tendências futuras e estimar os riscos de inundação, demostrando que o uso combinado de diferentes modelos reduz a sua incerteza e aumenta a confiança e consistência das previsões.

Palavras-chave: Estuários, hidromorfodinâmica, modelos numéricos, eventos extremos, alterações climáticas.

Abstract: Detailed knowledge of estuarine hydrodynamics is key to taking measures to reduce the vulnerability and increase the resilience of estuaries. Numerical models can play a fundamental role in supporting decision making, but for that it is necessary that they produce reliable results. To achieve this, an ensemble technique is proposed that combines the results of different models. This is the main objective of the EsCo-Ensembles project, in which two numerical models were developed and applied in the Douro and Minho estuaries, considering several scenarios of current and future conditions, floods and extreme sea level values according to the IPCC's RPCs projections.

The results of this project are expected to provide a complete hydro-morphodynamic characterization of the concerned estuarine areas, allowing future trends to be assessed and flood risks estimated, demonstrating that the combined use of different models reduces their uncertainty and increases confidence in and consistency of the forecasts.

Keywords: Estuaries, hydro-morphodynamics, numerical models, extreme events, climate change.

Introdução: Orla costeira e vulnerabilidade

A orla costeira, e particularmente as áreas estuarinas, é de grande importância estratégica do ponto de vista ambiental, económico e social, providenciando uma grande quantidade de serviços de ecossistema como alimentos, pesca, turismo, atividades de recreio, energia, captação de água ou matérias-primas. São áreas densamente povoadas e altamente urbanizadas, e de significativo valor económico e social, concentrando, ao mesmo tempo, atividades antropogénicas como lazer, turismo, pesca e outras indústrias marítimas. Aproximadamente 40 % da população mundial reside a uma distância de até 100 km da costa, e essa percentagem está a aumentar devido à migração do interior para áreas costeiras nas últimas décadas, o que implica também um aumento das atividades económicas, das infraestruturas costeiras e da intensificação da atividade urbanística (Bell *et al.*, 2017; Dangendorf *et al.*, 2012; Hallegatte *et al.*, 2013; IPCC, 2012; Moser *et al.*, 2014). Dentro da orla costeira situam-se os estuários, que são corpos aquáticos costeiros onde ocorre a transição entre as massas de água dos rios e do mar. São sistemas extremamente dinâmicos, com grandes variações a nível de salinidade, correntes, estratificação e qualidade da água, estando sujeitos à influência de fenómenos meteo-oceanográficos e geomorfológicos como o vento, a maré, as ondas, as correntes, os caudais fluviais, a batimetria e a configuração das margens. Em termos de ecossistemas, são áreas altamente produtivas, apresentando grandes concentrações de nutrientes e servindo como habitat a numerosas espécies, para além de habitualmente apresentarem vastas áreas urbanas devido à sua situação privilegiada em termos de recursos pesqueiros, proteção de embarcações e transporte fluvial e marítimo. Esta ocupação massiva causa uma urbanização do solo, com uma artificialização das margens e perda de biodiversidade, afetando a estabilidade física e ambiental do estuário, aumentando a sua vulnerabilidade à ação dos fenómenos meteo-oceanográficos, e colocando em risco a população e o seu património, com efeitos adversos para a economia da região (Peixoto, 2016). Considerando também que no atual contexto das alterações climáticas se tem registado um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos (IPCC, 2012), é expectável que, no futuro, eventos deste tipo tenham consequências potencialmente mais graves ou até catastróficas para a sociedade

e para o ambiente, com impactos em termos de vidas humanas e danos nas infraestruturas, e com perda de património público e privado, habitats e serviços de ecossistema (Bell *et al*., 2017; Vose *et al*., 2014).

As zonas húmidas das orlas costeiras são áreas altamente produtivas, essenciais para a pesca e conservação da natureza, mas também como proteção natural contra inundações. Os eventos extremos, as alterações climáticas e as atividades antrópicas podem colocar em risco o equilíbrio destas áreas, sendo importante avaliar estes efeitos de forma local. As alterações ao nível do mar não são uniformes, nem espacial nem temporalmente, devido à influência das correntes oceânicas, à perda de massas de gelo, às variações no armazenamento de água, à expansão térmica e às mudanças de densidade das massas de água oceânicas (Melo *et al*., 2020). Isto reforça a importância de estudos detalhados, a escalas espácio-temporais adequadas, e de previsões fiáveis que permitam avaliar com precisão o risco a que está exposta uma determinada área.

A relação entre os diversos conceitos subjacentes ao risco está exemplificada na fig. 1. O risco de desastre é definido como a probabilidade de que venha a acontecer, durante um determinado período de tempo, uma alteração grave no funcionamento normal de uma comunidade devida a eventos meteo-oceanográficos, geológicos, químicos, etc. perigosos que interajam com zonas que se encontram em condições vulneráveis. Isto pode produzir efeitos adversos generalizados em diversos sectores, com perdas humanas, materiais, económicas ou ambientais, que requerem uma resposta de emergência imediata. O risco de desastre deriva de uma combinação de perigos físicos e vulnerabilidades dos elementos expostos, que poderá produzir uma interrupção severa do normal funcionamento da área afetada (IPCC, 2012). De forma a reduzir o impacto destes riscos nas populações e ecossistemas costeiros, são importantes as ações de governação que permitirão projetar, implementar e avaliar estratégias, políticas e medidas de mitigação e adaptação, considerando as trajetórias socioeconómicas de uma determinada área.

No caso da orla costeira, e desde um ponto de vista matemático e físico, um evento extremo pode ser considerado como um estado que está fora dos padrões considerados normais e que tem certa perigosidade para a população e o meio ambiente, afetando-os de diferentes formas, dependendo da sua exposição e da

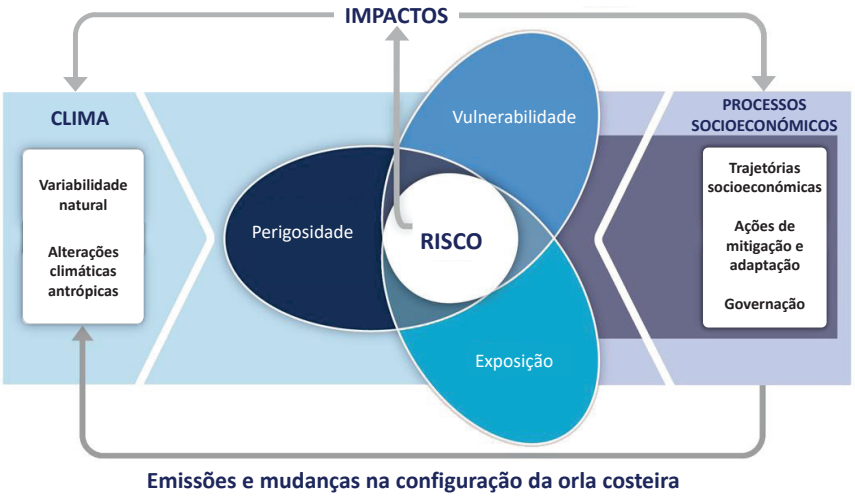

Fig. 1 - Relacionamento entre os diferentes conceitos-chave envolvidos na gestão do risco em áreas costeiras e a sua adaptação às mudanças climáticas (adaptado de IPCC, 2012).

Fig. 1 - *Relationship between the different key concepts involved in risk management in coastal areas and their adaptation to climate change (adapted from IPCC, 2012).*

sua vulnerabilidade mas também da sua resiliência (Radović e Iglesias, 2019). Inundações associadas à agitação marítima e a descargas fluviais, trombas de água, ciclones tropicais e ventos fortes são os principais eventos extremos que podem causar impactos na orla costeira. As ondas podem gerar fortes processos erosivos e os ventos acentuam as marés e aumentam a altura das ondas provocando a sobrelevação meteorológica, um fenómeno que ocasiona intensas inundações e que pode danificar estruturas, mas que também tem um efeito muito importante nos processos de erosão e acreção (Vose *et al.*, 2014).

Existe, portanto, uma necessidade urgente de informação científica e técnica precisa que esteja disponível aos decisores, de forma a apoiar uma gestão costeira sustentável (Coelho *et al.*, 2009; Veloso-Gomes, 2016). Esta informação, inserida na implementação de sistemas de previsão e alerta, pode providenciar soluções que permitam a mitigação dos impactos negativos associados a eventos extremos, alterações climáticas e intervenções antrópicas na orla costeira. De facto, essa informação científica e técnica revela-se muito relevante para o apoio de uma gestão costeira sustentável, pois pode ajudar na implementação de medidas para reduzir

a exposição e vulnerabilidade destas áreas, mitigar os riscos associados aos diversos cenários e promover a adaptação e a resiliência das comunidades aos potenciais impactos adversos.

Para conseguir fornecer esta informação precisa, é necessário compreender, de forma abrangente, todos os processos hidromorfodinâmicos que têm lugar na orla costeira, e as suas interações com as atividades antropogénicas e os ecossistemas. A medição *in situ* de determinados parâmetros meteorológicos, oceanográficos, morfológicos, químicos e biológicos, para além de permitir a definição das normais climatológicas, pode ajudar nesta compreensão, possibilitando a representação do estado atual dos sistemas e as suas principais tendências de evolução. No entanto, a obtenção deste tipo de dados não é simples, pois requer uma planificação detalhada e uma monitorização constante, que nem sempre é viável. Como consequência, existe uma falta enorme de observações contínuas e de longo prazo, com a resolução temporal e espacial requerida para conseguir descrever em detalhe os processos naturais que têm lugar na orla costeira. Este conhecimento limitado, relacionado com uma falta de monitorização sistemática, mas também com a complexidade do sistema, leva a um alto grau de incerteza sobre os cenários futuros e os efeitos que estes terão sobre as populações e os ecossistemas (Iglesias *et al.*, 2019b).

Existem ferramentas que permitem ultrapassar esta desinformação, caracterizando de forma completa e robusta a dinâmica costeira e estuarina e prevendo as suas tendências. Essas ferramentas são os modelos numéricos (Coelho *et al.*, 2009; Iglesias *et al.*, 2018a; Iglesias *et al.*, 2016; Pereira, 2016). Os modelos numéricos são complexas estruturas de cálculo que integram as equações principais que governam a dinâmica e as interações do sistema climático. Dependendo da sua complexidade, do objetivo de aplicação e das escalas temporais e espaciais consideradas, podemos ter modelos numéricos meteorológicos, climáticos, oceânicos, de ondas, biogeoquímicos, geológicos, etc. Particularmente, os modelos numéricos podem ser aplicados a áreas costeiras/estuarinas para a previsão de tendências e de respostas a diferentes cenários, apoiando assim a implementação de planos de ação sustentáveis. No entanto, é de salientar que os dados de campo são cruciais para a implementação adequada dos modelos numéricos. Estes dados medidos *in situ* são necessários para definir os estados iniciais dos modelos, as condições de forçamento

e os parâmetros de calibração. Os dados de campo também são necessários para avaliar o desempenho dos modelos numéricos, comparando os resultados do modelo com as medições. Assim, apesar dos modelos numéricos avançados serem excelentes ferramentas para compreender o comportamento dinâmico das áreas costeiras, campanhas abrangentes de monitorização periódica ou contínua nas regiões estuarinas e costeiras são ainda cruciais para garantir a qualidade e eficácia da aplicação dos modelos numéricos.

Como melhorar os resultados dos modelos numéricos: A técnica dos *ensembles*

Conforme mencionado na secção anterior, um modelo numérico é uma ferramenta matemática que inclui complexas estruturas de cálculo. A comunidade científica tem realizado um esforço considerável para fornecer as ferramentas mais precisas para a representação da circulação estuarina e costeira. A melhoria dos equipamentos e o avanço das técnicas computacionais têm permitido aumentar a quantidade de cálculos e diminuir o tempo de computação. Assim, tem sido possível gerar sistemas de modelação numérica de alta resolução espacial e temporal, cujos resultados constituem instrumentos essenciais de apoio à tomada de decisão, considerados indispensáveis no desenvolvimento de uma gestão marinha e costeira efetiva e integrada.

Na área estuarina e costeira, os modelos numéricos hidromorfodinâmicos permitem representar os processos dinâmicos destes sistemas, sendo essenciais na avaliação do efeito de cada um dos forçamentos considerados através das mudanças nas condições iniciais e de fronteira, nas características topo-batimétricas ou nas estruturas costeiras (Bastos *et al.*, 2016; Iglesias *et al.*, 2016; Teng *et al.*, 2017). Com as atuais ferramentas disponíveis, que apresentam uma grande variedade de técnicas, é possível representar, de forma precisa e detalhada, as condições físicas das áreas costeiras e estuarinas. As técnicas numéricas podem ser baseadas em diversos métodos: elementos finitos, diferenças finitas, volumes finitos, elementos de fronteira ou técnicas eulerianas-lagrangianas. Os algoritmos de integração no tempo podem ser explícitos, implícitos, semi-implícitos ou baseados em

características. As equações podem ser de primeira, segunda ou ordem superior, e as dimensões espaciais podem ser unidimensionais (no plano horizontal 1DH ou no vertical 1DV), bidimensionais (2DH ou 2DV), ou tridimensionais (3D) (Antunes do Carmo *et al.*, 1993; Panayotis, 2016). Portanto, é fulcral selecionar adequadamente a ferramenta numérica mais adequada para os problemas específicos que se pretendem resolver. Essa seleção deve ser feita estabelecendo um compromisso entre os dados disponíveis para calibração e validação do modelo, os objetivos das simulações e os recursos computacionais disponíveis (Iglesias *et al.*, 2019b).

Atualmente, algumas das ferramentas mais utilizadas, como o Delft3D (oss.deltares.nl/web/delft3d), open TELEMAC-MASCARET (www.opentelemac.org), SWASH (swash.sourceforge.net), ROMS (www.myroms.org) ou MOHID (www.mohid.com), entre outros, são capazes de simular vários processos físicos como marés, efeito da batimetria na dinâmica, atrito, descargas fluviais, elevação da superfície livre, velocidade e direção das correntes, ação do vento, ondas, efeitos dos gradientes de densidade, etc. Algumas destas ferramentas também incluem módulos para a representação de outros processos, como a qualidade da água, a migração de larvas, a concentração de nutrientes, a distribuição/concentração de poluentes e o transporte de sedimentos, entre outros.

Existe, portanto, uma ampla gama de modelos numéricos que podem ser aplicados, como revelam alguns dos muitos estudos implementados em áreas estuarinas (Avilez-Valente e Seabra-Santos, 2009; Dias *et al.*, 2013; Jones e Davies, 2010; Gomes *et al.*, 2015; Horritt e Bates, 2002; Iglesias *et al.*, 2016, 2018; Mesquita *et al.*, 2009; Monteiro *et al.*, 2011; Peixoto e Pinho, 2013; Pinho e Vieira, 2007; Pinho *et al.*, 2015; Robins e Davies, 2010; Sutherland *et al.*, 2004; van Maren *et al.*, 2015). No entanto, cada modelo numérico tem as suas próprias vantagens e limitações, e as suas soluções contêm incertezas. Estas incertezas podem estar na inicialização dos modelos devido, por exemplo, a dados incompletos, a erros de medida ou a erros no tratamento de dados, ou no próprio modelo devido à parametrização dos processos físicos, a imprecisões na definição dos parâmetros, ao efeito das escalas que não são resolvidas ou a erros nas condições de fronteira (Weigel *et al.*, 2007). Para além disto, não pode ser esquecido o facto de que qualquer tentativa de representar a natureza através de um conjunto de equações será sempre uma simplificação da realidade que, inevitavelmente, introduz

incertezas. Embora as equações diferenciais parciais sejam bem conhecidas, estas devem ser truncadas para um conjunto de dimensão finita de equações diferenciais ordinárias a fim de poderem ser integradas e resolvidas computacionalmente. As incertezas associadas a este processo podem propagar-se e ter efeitos em todo o espectro de escalas previstas pelo modelo (Hagedorn, Doblas-Reyes e Palmer, 2005). Para produzir uma previsão perfeita, precisaríamos de um conhecimento exato de cada processo e de cada estado do sistema, e isto teria de ser perfeitamente implementado na previsão. Na realidade, isto só é possível ser feito de forma aproximada, pois até a quantificação atual do sistema pode estar acompanhada de incertezas. Estas e outras incertezas, mesmo que pequenas, podem produzir grandes erros na previsão já que estamos perante sistemas tendencialmente caóticos (fig. 2, DWD, 2021). Devido à necessidade premente de obtenção de previsões precisas, erros deste tipo devem ser minimizados. Daí surge a importância de implementar novas soluções que permitam obter resultados mais precisos. E uma destas soluções é a técnica de *ensembles*.

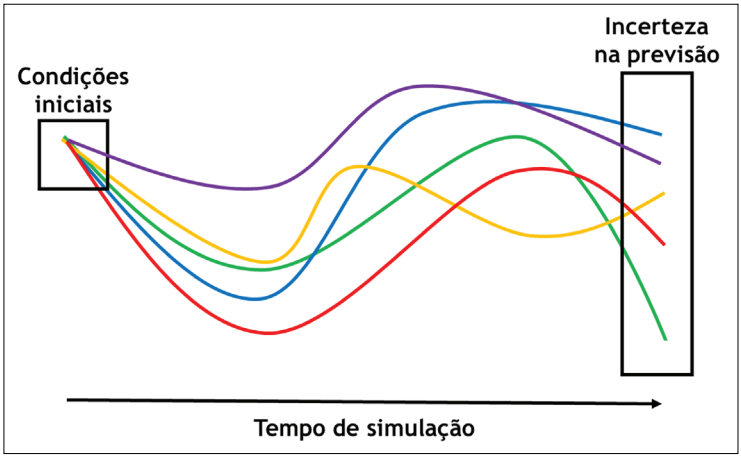

Fig. 2 - Principio básico de uma previsão por *ensembles* (adaptado de DWD, 2021).
***Fig. 2** - Basic principle of an ensemble prediction (adapted from DWD, 2021).*

Um dos desenvolvimentos mais promissores na melhoria das previsões obtidas com modelos numéricos são os sistemas de previsão de conjunto, ou *ensembles*. Um *ensemble* consiste na combinação de várias soluções de modelos numéricos

utilizando métodos estatísticos. Esta técnica consiste em executar dois ou mais modelos numéricos similares com as mesmas condições. Os resultados são sintetizados numa única solução que irá melhorar a precisão, confiabilidade e consistência da previsão final quando comparada com as soluções individuais de cada modelo (Tebaldi e Knutti, 2007). Trata-se de uma técnica já amplamente aplicada em ciências atmosféricas e climáticas para a previsão meteorológica e dos efeitos das alterações climáticas (IPCC, 2021; Weigel *et al.*, 2007; WMO, 2012). Outras áreas onde os *ensembles* têm sido aplicados são a hidrologia (Ajami *et al.*, 2006), a morfodinâmica (Thornhill *et al.*, 2012), a previsão da agitação marítima (Fan *et al.*, 2013), a saúde pública (Thomson *et al.*, 2006), a agricultura (Cantelaube e Terres, 2005), a segurança da informação (Menahem *et al.*, 2009), a astronomia e a astrofísica (Bazell e Aha, 2001), a geografia e a deteção remota (Benediktsson *et al.*, 2007), as finanças (Leigh *et al.*, 2002), a medicina (Polikar *et al.*, 2008) e a bioinformática (Re e Valentini, 2010). Em hidrodinâmica estuarina, este tipo de técnicas é ainda incipiente, tendo apenas sido identificados os trabalhos de Das *et al.* (2016) e Iglesias *et al.* (2018).

A ideia da incerteza na previsão foi introduzida pela primeira vez por Lorenz (1965, 1963). Nos seus trabalhos, Lorenz examinou as incertezas dos estados iniciais e o efeito que poderiam ter estas incertezas nas previsões, enunciando o conhecido efeito borboleta, uma metáfora que faz referência à sensibilidade às condições iniciais do sistema, característica essencial dos sistemas caóticos. Na resolução de um sistema por processos iterativos, Lorenz verificou que uma simples diferença na ordem das décimas de milésimas numa variável traduzia-se em soluções completamente diferentes das anteriormente obtidas. Assim, para explicar este fenómeno, utilizou a seguinte metáfora: "Será que o bater das asas de uma borboleta hoje em Tóquio pode provocar uma tempestade violenta sobre Nova York em poucas semanas?". Centrado na atmosfera, Lorenz observou que este sistema é fundamentalmente caótico devido à não linearidade dos processos que nele acontecem. Assim, demonstrou que não importa quão boas sejam as observações ou as técnicas de previsão, haverá sempre um limite intransponível de quão longe no futuro é possível fazer uma boa previsão (Roy Bhowmik e Durai, 2008). Depois dos estudos de Lorenz, a ideia de combinar previsões de vários

modelos foi explorada, há mais de 30 anos, em econometria e estatística (Bates e Granger, 1969; Dickinson, 1973; Newbold e Granger, 1974). O salto para a área das ciências da Terra foi dado por Epstein (1969), Leith (1974) e Thompson (1977), que incluíram o conceito de *ensembles* na previsão do tempo.

Um *ensemble* gera, portanto, uma previsão baseada num conjunto de previsões. Os modelos numéricos membros do conjunto podem incluir diferentes condições iniciais ou de fronteira e/ou diferentes formulações ou parametrizações dos fenómenos de forma a refletir a incerteza associada à formulação matemática dos fenómenos físicos (Buizza *et al.*, 2005; Demeritt *et al.*, 2007). Desta maneira, a previsão final é obtida na forma de uma distribuição de probabilidade de ocorrência de um determinado evento com uma determinada magnitude, permitindo quantificar o risco associado a esse evento e tendo um maior valor económico do que as previsões determinísticas para uma ampla gama de aplicações, tais como geração de energia elétrica, definição de rotas de aeronaves e navios, produção agrícola, propagação de doenças, etc. (Gneiting e Raftery, 2005).

Podem distinguir-se dois tipos principais de *ensembles*: os que utilizam resultados de um único modelo e os que são calculados com base nos resultados de vários modelos. Os *ensembles* compostos por um único modelo consistem na combinação de resultados de simulações obtidos com condições iniciais e/ou de fronteira com variações muito pequenas. Para aqueles *ensembles* que utilizam vários modelos, a combinação é feita com os resultados obtidos com simulações produzidas por diferentes modelos numéricos, utilizando as mesmas condições iniciais e de fronteira (Iglesias *et al.*, 2019b). Tem sido demonstrado que os *ensembles* constituídos por uma pluralidade de modelos apresentam um desempenho melhor do que qualquer combinação de soluções de um modelo único (Georgakakos *et al.*, 2004; Hagedorn *et al.*, 2005; Krishnamurti *et al.*, 1999; Palmer *et al.*, 2005).

Há diversas técnicas estatísticas que são utilizadas para combinar os resultados dos modelos e construir a solução do *ensemble*. Para além da mediana, a técnica mais simples é a média aritmética, que consiste em calcular a média aritmética simples dos resultados das simulações. Esta técnica é por vezes implementada na construção de *ensembles* de previsão, sem que seja posteriormente aplicada qualquer

validação dos resultados dos modelos com observações *in situ* dos parâmetros que estão a ser previstos. No entanto, modelos numéricos diferentes (ou corridas diferentes do mesmo modelo) têm geralmente capacidades de simulação diferentes. Uma variável pode ser mais bem estimada por um dos modelos e pior por outro. Pode também acontecer que cada um dos modelos produza melhores estimativas sob certas condições e piores estimativas sob outras condições. O procedimento mais adequado terá de ter em consideração as capacidades de previsão específicas de cada modelo. Tal é possível aplicando o método das médias ponderadas, atribuindo diferentes coeficientes de ponderação aos modelos de acordo com o seu desempenho (Feng *et al.*, 2011). Estes coeficientes de ponderação deverão ser obtidos da comparação dos resultados das simulações com as observações, podendo ser parâmetros estatísticos, como os coeficientes de correlação e/ou os erros quadráticos médios, ou regressões lineares múltiplas (Chakraborty e Krishnamurti, 2006; Roy Bhowmik e Durai, 2010; Woodcock e Engel, 2005). Para isso, é necessário realizar simulações históricas antes de efetuar previsões. Não obstante, há autores que mostraram que não há evidência de que um esquema de médias ponderadas forneça resultados mais próximos das observações do que o estabelecimento de ponderações iguais ou aleatórias (e.g. Déqué e Somot, 2010). Outros métodos mais complexos passam por regressões lineares, regressões não lineares, regressão por componentes principais, decomposição em valores singulares, esquemas compósitos, programação linear, superensembles multimodelo, método Supra Bayesiano e redes neuronais (Ajami *et al.*, 2006; Bernhofen *et al.*, 2018; Das *et al.*, 2016; Feng *et al.*, 2011; Krishnamurti *et al.*, 1999; Kumar *et al.*, 2012; Roy Bhowmik e Durai, 2008, 2010; Rozante *et al.*, 2014; Viney *et al.*, 2009; WMO, 2012). Para a aplicação da técnica de *ensembles* na hidrodinâmica de estuários, deve, portanto, ser investigado qual o método mais apropriado para a construção desses *ensembles*.

A técnica de *ensembles* pode, portanto, ser usada para melhorar as previsões de modelos individuais, reduzindo a sua incerteza e fornecendo resultados mais precisos para uma variedade de sectores. Baseado na importância de desenvolver esta técnica na área da modelação numérica de processos hidromorfodinâmicos, surge o projeto EsCo-Ensembles.

O projeto EsCo-Ensembles

O principal objetivo do projeto EsCo-Ensembles (FCT, 2018-2022) é a criação de uma ferramenta, o *ensemble*, baseada em modelos numéricos hidromorfodinâmicos, que permita simular os principais padrões estuarinos considerando diferentes cenários representativos de condições normais (cenários de verão e inverno), de eventos extremos (cheias, sobre-elevação meteorológica) e de alterações climáticas (elevação do nível médio do mar) (cf. fig. 3). Esta ferramenta contribuirá para a mitigação dos impactos das alterações climáticas e a adaptação das áreas suscetíveis às mesmas, através da identificação das áreas vulneráveis a inundações, a efeitos de erosão/acreção relacionados com a modificação dos padrões hidrodinâmicos e a mudança das condições físicas. Conhecendo os riscos associados, será possível avaliar os efeitos das alterações climáticas, de forma a desenvolver protocolos para a gestão e proteção destas áreas. O *ensemble* também proporcionará informação relevante para o estudo de infraestruturas hidráulicas e adaptação destas infraestruturas aos eventos extremos e às alterações climáticas. Assim, é esperado que, no fim do projeto, este venha a contribuir para: (i) fornecer uma caracterização hidrodinâmica completa dos estuários considerados; (ii) avaliar futuras tendências; (iii) entender a distribuição da biota e o funcionamento dos ecossistemas; e (iv) estimar os riscos de inundações face à elevação do nível médio do mar associada ao aquecimento global.

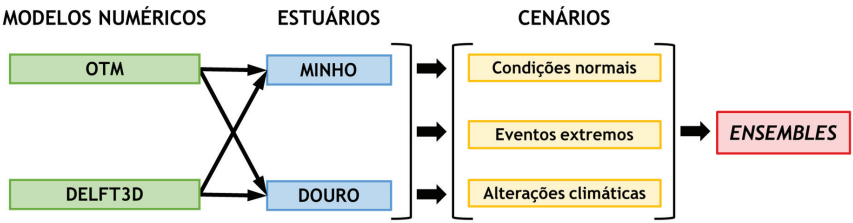

Fig. 3 - Diagrama de fluxo do projeto EsCo-Ensembles.
Fig. 3 - *Flow diagram of the EsCo-Ensembles project.*

Os modelos numéricos escolhidos são o openTELEMAC-MASCARET (OTM) e o Delft3D. Estes dois modelos resolvem as equações de águas pouco profundas considerando diversos processos, como o atrito no fundo, turbulência,

escoamentos rápido, lento e crítico e efeito dos gradientes horizontais de densidade. Apresentam uma grande capacidade de simular com precisão o comportamento hidromorfodinâmico em áreas costeiras, fluviais e estuarinas (Corti e Pennati, 2000; Putra *et al.*, 2015), permitindo incorporar nas simulações os efeitos das marés, as zonas inter-marés, as variações de batimetria, as descargas fluviais e o efeito da rotação da Terra (Jones e Davies, 2010; Monteiro *et al.*, 2011; Robins e Davies, 2010; van Maren *et al.*, 2015). Os resultados obtidos por estes modelos permitem quantificar os efeitos das alterações climáticas e avaliar o risco de inundação de uma região (Gomes *et al.*, 2015; Horritt e Bates, 2002). O OTM utiliza o método de elementos finitos e malhas triangulares lineares não estruturadas, que permitem uma boa resolução do domínio computacional mesmo para geometrias complexas, melhorando a descrição hidrodinâmica com um custo computacional reduzido. O Delft3D utiliza o método dos volumes finitos e pode incorporar vários tipos de malhas: regulares e irregulares.

Outro objetivo do EsCo-Ensembles é a análise e avaliação de registos de diversos parâmetros meteo-oceanográficos e morfológicos (vento, precipitação, correntes, ondas, temperatura, salinidade, marés, caudais, batimetria, transporte de sedimentos, episódios de inundação e seca, etc.) gerados no âmbito de projetos nacionais e internacionais em que a equipa tem participado (ECOIS, NICC, ECORISK, ECOSERVICES, MarInfo, RAIA, RAIA.co, RAIA TEC, MarRISK, PesTC/Mar/LA0015/2011, PesTC/Mar/LA0015/2013). Considerar-se-ão ainda outras bases de dados, tais como as disponibilizadas por *Puertos del Estado* (www.puertos.es/es-es), Instituto Hidrográfico (IH, www.hidrografico.pt), Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL, www.apdl.pt), Direção-Geral do Território (DGT, www.dgterritorio.pt), Energias de Portugal (EDP, www.edp.pt), Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH, snirh.apambiente.pt), *Confederación Hidrográfica del Minho-Sil* (www.chminosil.es), Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, www.ipma.pt) e MeteoGalicia (www.meteogalicia.gal). Estas bases de dados, para além de fornecerem parâmetros essenciais para a construção dos modelos e para a definição dos cenários de simulação, permitirão ainda calibrá-los e validá-los, bem como validar o *ensemble* gerado. Para além disso, o projeto prevê a realização de

campanhas de amostragem para a medição de parâmetros adicionais. De facto, existem lacunas de informação sobre as zonas próximas dos limites superiores dos estuários, pelo que os dados obtidos durante o EsCo-Ensembles servirão para completar as bases de dados preexistentes e para certificar que os modelos e os *ensembles* desenvolvidos produzem uma previsão correta para toda a extensão dos estuários considerados, nomeadamente o estuário do Douro e o estuário do Minho.

Porquê os estuários do Douro e do Minho?

Os estuários do Douro e do Minho foram escolhidos para este trabalho devido às diferenças na sua dinâmica e nas condições ambientais. Conforme analisado por Iglesias *et al*. (2019b), apesar de apresentarem regimes sazonais de caudal semelhantes (mínimo no verão e máximo no inverno), os valores, os padrões do caudal e as descargas de pico associadas a diferentes períodos de retorno diferem, sendo o Douro muito mais caudaloso do que o Minho. Outras diferenças radicam na própria configuração morfológica e batimétrica, na extensão da área estuarina, no tipo de margens, na configuração da foz e no seu nível de urbanização. Devido a estas especificidades, cada estuário terá condições diferentes e problemas diferentes, justificando a necessidade de uma análise local pormenorizada que forneça informação relevante de forma a conseguir antecipar o comportamento destes estuários no futuro e a poder prever possíveis riscos.

O Douro é um dos principais rios da Península Ibérica e alcança o Oceano Atlântico num estuário urbano no norte de Portugal, rodeado por duas grandes cidades: Porto e Vila Nova de Gaia. Esse estuário é relativamente estreito e altamente dinâmico, com regimes torrenciais que produzem fortes correntes e cheias recorrentes, com importantes efeitos nas suas margens, nas condições de navegabilidade e nas populações ribeirinhas (Bastos *et al.*, 2012). Apresenta uma configuração batimétrica irregular, com profundidades geralmente entre os 0 e os 10 m, e com alguns fundões de até 28 m associados a secções mais estreitas, curvas externas e locais de extração de sedimentos (fig. 4, Portela, 2008). A sua dinâmica é definida pela componente fluvial, sendo muito dependente de condições naturais,

mas também da necessidade de produção hidroelétrica da barragem de Crestuma-Lever e das outras barragens da bacia hidrográfica, tanto em território nacional como em territorio espanhol. A barragem de Crestuma-Lever limita o estuário a montante, estabelecendo a extensão deste em 21 km. Na margem sul da foz do estuário encontra-se uma zona húmida (Baía de São Paio) catalogada como reserva natural, e uma barra de areia ou restinga (Cabedelo) que obstrui parcialmente a foz do rio, protegendo o estuário das tempestades provenientes do oceano. Esta barra é formada por sedimentos de origem fluvial e marítima, estando a sua morfodinâmica condicionada por processos naturais (vento, chuva, caudal do rio, ondas, marés e tempestades) e humanos (construção de quebra-mares e barragens, extração de areia e dragagem) (Granja *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2010). Desde o século XIX, a restinga apresenta uma migração lenta para o interior do estuário, deixando parcialmente exposta a área costeira adjacente. No passado, a restinga era muito dinâmica. Sofria fases de erosão (ligadas a cheias do rio Douro) e de recuperação e crescimento, sendo que a cabeça da barra se expandia frequentemente para norte, ocupando parcialmente o canal de navegação e provocando constrangimentos na navegabilidade do estuário. Consequentemente, o canal de navegação tinha de ser mantido à custa de dragagens regulares. Para evitar estas dificuldades e garantir a segurança da navegação na barra do estuário, foram construídos um novo quebra-mar norte e um quebra-mar destacado a sul com uma orientação paralela à cabeça da restinga (ver fig. 4). Estas estruturas, concluídas em 2008, têm interferido nos padrões hidromorfodinâmicos do estuário, causando o assoreamento da Baía de São Paio e o aumento significativo em área e volume da restinga num período relativamente curto (~10 anos) (Bastos *et al.*, 2012; Teodoro *et al.*, 2011). Registos históricos revelaram roturas ou destruição parcial desta barra durante cheias, o que permitia uma descarga rápida do excesso de água dentro da área estuarina, reduzindo o risco de inundações urbanas. A sua configuração atual, mais estável e robusta, reduz a probabilidade de rotura, pelo que são expectáveis efeitos mais severos em termos de perdas económicas e de danos estruturais durante uma cheia (Iglesias *et al.*, 2018a).

Assim, um dos principais problemas do estuário do Douro é o risco de cheias e o efeito que estas poderão vir a ter na população ribeirinha, nas atividades realizadas no estuário e nas margens, nas estruturas e instalações, e no turismo.

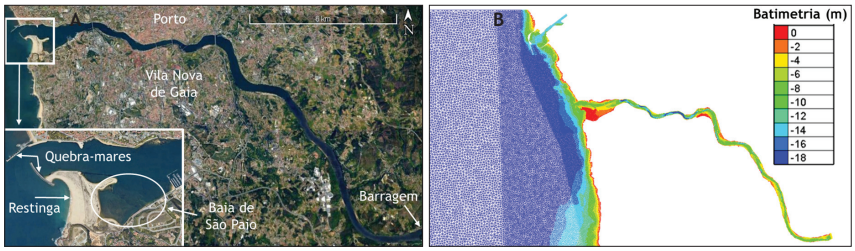

Fig. 4 - Estruturas principais do estuário do Douro (a) (imagem obtida do *Google Earth*); Profundidade do estuário do Douro (b) (dados fornecidos pelo IH).

Fig. 4 - *Main structures of the Douro estuary (a) (image courtesy of Google Earth); Depth of the Douro estuary (b) (data provided by IH [Hydrographic Institute]).*

O estuário do Douro é considerado como sendo um ecossistema com alto impacto antropogénico, localizado numa área altamente urbanizada, com instalações portuárias, atividades e estruturas comerciais, pesqueiras e turísticas, efluentes industriais e urbanos, e descarga de efluentes agrícolas e de esgotos domésticos, onde numerosos contaminantes têm sido encontrados (Almeida *et al.*, 2006; Costa-Dias *et al.*, 2018; Gouveia *et al.*, 2018; Gravato *et al.*, 2010; Guimarães *et al.*, 2009; Iglesias *et al.*, 2020; Mucha *et al.*, 2004). Para caudais superiores a 700 m^3/s, toda a água doce é descarregada no mar, o estuário é preenchido com água doce e a intrusão de água salgada não acontece, mesmo com condições de maré de elevada amplitude. Para valores abaixo dos 700 m^3/s, que são observados durante aproximadamente 74% do tempo, a água do oceano entra na região estuarina com uma configuração de cunha salina que pode atuar sobre os sedimentos já depositados no fundo do estuario levando à sua ressuspensão. Ao mesmo tempo, os contaminantes depositados no fundo são também ressuspendidos e dispersos por todo o estuário (Iglesias *et al.*, 2020). Estas configurações produzem uma forte variabilidade no tempo de residência da água doce, que pode variar de 8 h a mais de 2 semanas, dependendo do caudal, o que afeta fortemente a dispersão de sedimentos e de contaminantes (Azevedo *et al.*, 2008). A configuração atual da restinga tem também gerado zonas de águas estagnadas com maiores tempos de residência, que podem prolongar a permanência dos contaminantes dentro da área estuarina (Iglesias *et al.*, 2018a).

O rio Minho é também um rio internacional, que desagua no Oceano Atlântico entre A Guarda (Espanha) e Caminha (Portugal), constituindo os últimos 70 km do seu percurso uma fronteira natural entre Espanha e Portugal (cf. fig. 5). A característica mais importante da região estuarina do Minho é a sua grande diversidade de habitats, que albergam espécies protegidas, e a sua importância para as espécies marinhas e para o funcionamento do ecossistema (Domínguez *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2016). O estuário é protegido por estatutos de conservação portugueses e espanhóis e preserva um baixo nível de industrialização e urbanização moderada. Apesar do baixo nível de industrialização, existem algumas ameaças associadas a riscos de poluição, inundações, erosão e assoreamento, má manutenção dos canais de navegação e degradação costeira. Essas ameaças podem afetar a qualidade ambiental e podem ser consideradas como os principais riscos nesta região estuarina (APA, 2012; Mil-Homens *et al.*, 2013; Sousa *et al.*, 2005). Em termos de atividades antrópicas, as pressões e impactos ambientais têm aumentando nos últimos anos. O estuário é vulnerável a poluentes, devido ao longo tempo de residência que impede a água de chegar rapidamente ao oceano, à pequena área estuarina e aos volumes de água relativamente baixos, que diminuem a capacidade de diluir os contaminantes (Ribeiro *et al.*, 2016).

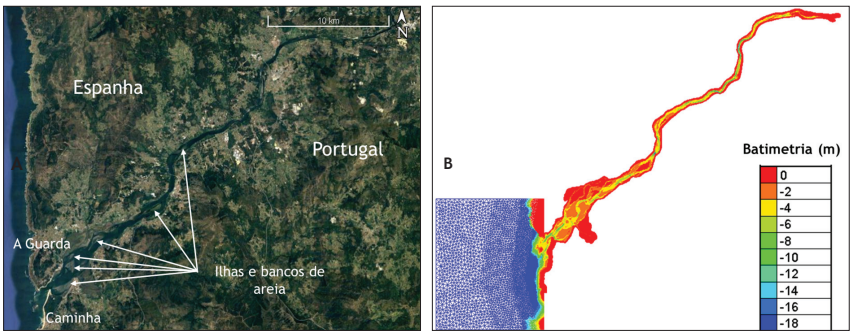

Fig. 5 - Estruturas principais do estuário do Minho (a) (imagem obtida do *Google Earth*); Profundidade do estuário do Minho (b) (dados fornecidos pelo IH).

Fig. 5 - *Main structures of the Minho estuary (a) (image courtesy of Google Earth); Depth of the Minho estuary (b) (data provided by IH [Hydrographic Institute]).*

O estuário do Minho, que tem uma longitude de 40 km definida pela distância até onde é possível sentir o efeito da maré, é pouco profundo, com profundidades

médias de 4 m, ainda que profundidades em torno dos 20 m possam ser encontradas em áreas onde o estreitamento do canal principal aumenta as velocidades das correntes e, consequentemente, a erosão (fig. 5, Freitas *et al.*, 2009; Reis *et al.*, 2009). O fluxo de água doce no estuário é controlado pela barragem de Frieira, localizada 80 km a montante da foz. Contudo, existem, entre esta barragem e o Atlântico, alguns afluentes que constituem uma fonte adicional de água doce, ainda que com uma influência menor devido às suas pequenas bacias hidrográficas (Iglesias *et al.*, 2019b). Comparativamente com o Douro, o rio Minho apresenta baixos valores de caudal, o que faz com que o tempo médio de residência da água neste estuário seja de 1,5 dias (Ferreira *et al.*, 2005). É um estuário parcialmente misturado, onde pode ocorrer uma estratificação vertical, devida à configuração tipo cunha salina que nele se pode desenvolver (Sousa *et al.*, 2005, 2014). Associada com esta cunha salina, a intrusão salina pode estender-se até 17 km a montante da foz (Baeta *et al.*, 2017). A dinâmica neste estuário pode ser dominada pelo aporte fluvial ou pela maré, dependendo da magnitude destes dois parâmetros de forçamento. Caudais extremos irão alterar o padrão de circulação e restringirão a entrada de água oceânica na foz. A maré enchente atuará como força oposta à descarga do rio, fazendo com que as velocidades na enchente sejam menores do que na vazante e que a duração da vazante seja consequentemente maior do que a duração da enchente. Este efeito pode ser ainda mais forte para baixos caudais, os quais são muito habituais neste estuário. Assim, podemos afirmar que o estuário do Minho é fortemente influenciado pela maré, com um efeito direto no transporte de sedimentos (Iglesias *et al.*, 2018b). Para além disso, a parte inferior do estuário, perto da foz, apresenta um alargamento acentuado que resulta na diminuição da velocidade da corrente, criando condições favoráveis para a deposição de sedimentos (fig. 5), sendo este um dos principais problemas deste estuário: o forte assoreamento relacionado com a baixa velocidade da corrente (Delgado *et al.*, 2011; Melo *et al.*, 2020; Portela, 2011). Os padrões morfodinâmicos gerados pelo assoreamento podem provocar restrições na navegação e o surgimento de ilhas e bancos de areia durante a maré baixa (Reis *et al.*, 2009; Zacarias, 2007). Este facto é mais notável em condições de baixa-mar de marés vivas, quando a ligação entre o estuário e o mar fica restringida a dois canais rasos (Iglesias *et al.*, 2019a, 2019b).

Como definir cenários apropriados para a construção do *ensemble*

Devido à dificuldade inerente à implementação dos modelos numéricos em áreas estuarinas, às especificidades de cada modelo e de cada área estuarina, e ao tempo necessário até ter o modelo completamente configurado, dificilmente uma equipa consegue ou tem interesse em implementar mais do que um modelo numérico para a mesma área. A construção dos *ensembles* será, portanto, baseada em dois modelos desenvolvidos em separado pelas equipas que formam o EsCo-Ensembles: OTM pelo CIIMAR e Delft3D pelo CTAC. Considerou-se que um *ensemble* construído com uma única saída de cada modelo produziria poucas melhorias nos resultados em comparação com as saídas dos modelos individuais, pois não seria suficiente para abranger a incerteza inerente à modelação numérica. Assim, propõe-se a realização de uma combinação dos dois tipos principais de *ensembles*: os de um único modelo e os de vários modelos, de forma a maximizar o número de membros. Para isto, as condições iniciais de cada modelo serão ligeiramente modificadas em séries de corridas, dando lugar a várias simulações para o mesmo período, e o *ensemble* será calculado com os resultados de todas estas simulações.

Os modelos serão corridos para uma simulação histórica, para validar os resultados de cada um deles e do *ensemble* com medições *in situ*. Estas simulações referir-se-ão a 2006, ano em que foram realizadas várias campanhas no âmbito do projeto ECOIS nos dois estuários selecionados, que proporcionam os necessários dados reais de validação. Para este período foram escolhidos três cenários diferentes: condições de verão, condições de inverno e simulação extrema. Dentro de cada um destes cenários são consideradas combinações dos dois principais parâmetros que definem o comportamento hidrodinâmico destes estuários: o caudal e a maré. O caudal é introduzido como o caudal real, o caudal mais o desvio padrão do mês simulado e o caudal menos o desvio padrão do mês simulado. Os desvios padrões foram calculados com base nos caudais medidos em Foz do Mouro (1973-2020, fonte: SNIRH) para o Minho e em Crestuma-Lever (1998-2020, fonte: EDP) para o Douro. Para o nível do mar na fronteira oceânica, são considerados os valores máximo e mínimo da maré no dia escolhido para a simulação, e também os valores do máximo anual da preia-mar (PMmáx), da preia-mar de águas-vivas (PMAV), da

preia-mar de águas-mortas (PMAM), do mínimo anual da baixa-mar (BMmin), da baixa-mar de águas-vivas (BMAV) e da baixa-mar de águas-mortas (BMAM). Para o evento extremo não é considerado o desvio padrão no caudal, mas é inserida uma elevação adicional na maré associada com os fenómenos de sobre-elevação meteorológica (~1,1 m, de acordo com Almeida *et al*. (2009) e Gama *et al*. (1994)). Um resumo das principais simulações propostas é apresentado (fig. 6).

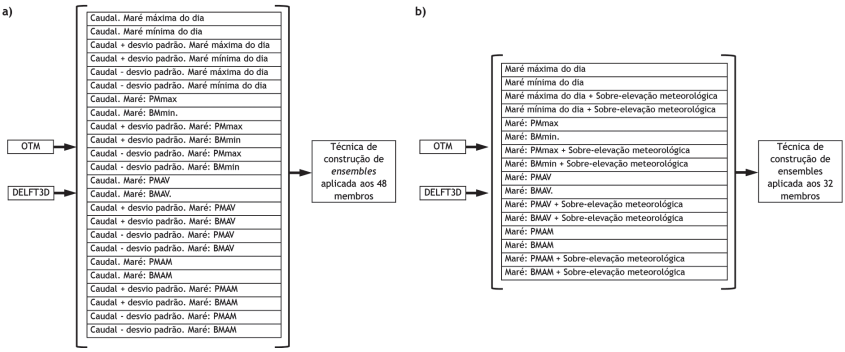

Fig. 6 - Cenários para a construção do *ensemble* com condições de verão e de inverno (a); Cenários para a construção do *ensemble* com condições de fluxo extremas (b).

Fig. 6 - *Scenarios to build the summer and winter ensemble (a); Scenarios to build the river flow extreme-event ensemble (b).*

Para comparar os resultados do *ensemble* com os dados *in situ* e validar o seu comportamento, podem ser escolhidos um conjunto de parâmetros estatísticos, como o erro quadrático médio ou a sua raiz quadrada, erro absoluto, desvio padrão, coeficiente de correlação de *Pearson*, enviezamento, *Brier score*, *Ranked Probability Skill Score*, tabelas de contingência, ou diagramas de dispersão.

Resultados preliminares obtidos para a simulação extrema mostram que o erro absoluto mínimo, obtido entre as observações e as simulações definidas na fig. 6b, apresenta valores de 0,609 m (0,096 m) e 0,041 m (0,182 m) com o OTM (Delft3D) para duas estações do estuário do Douro onde existem dados observacionais (Cantareira e Crestuma), e 0,081 m (0,162 m), 0,016 m (0,053 m) e 0,035 m (0,334 m) para três estações do estuário do Minho (Caminha, Cerveira e Segadães). Foram aplicadas técnicas simples de construção de *ensembles*, nomeadamente a

média, a mediana e uma média ponderada considerando o desempenho dos dois modelos numéricos, na qual a ponderação foi calculada utilizando os valores dos erros quadráticos. Ao comparar os valores dos *ensembles* construídos com a média aritmética e a mediana com os dados *in situ*, verificou-se que os erros absolutos daqueles *ensembles* foram superiores aos dos modelos individuais. Mas, para o caso da média ponderada com os erros quadráticos, os valores do erro absoluto foram inferiores para o *ensemble*, apresentando valores de 0,012 m e 0 m para Cantareira e Crestuma, no estuário do Douro, e de 0,037 m, 0,002 m e 0,028 m para Caminha, Cerveira e Segadães, no estuário do Minho. Isto demonstra a eficácia da técnica de *ensembles* na melhoria dos resultados de previsão.

Uma vez construído o *ensemble* para as condições históricas, as mesmas técnicas poderão ser aplicadas para a previsão de estados futuros. Podem ser aplicadas para representar a possível evolução, dentro de um intervalo de probabilidade, do efeito de atividades antrópicas como dragagens, construção de barragens ou modificação das margens, incluindo canais artificiais, marinas, solidificação das margens, remoção de barras, esporões, quebra-mares, edifícios, estradas, pontes, viadutos, rampas para barcos, etc. Este tipo de atividades pode produzir rápidas mudanças nos padrões hidromorfodinâmicos, com efeitos notáveis a curto prazo.

No contexto atual das alterações climáticas, com efeitos não só a nível global mas também regional e local, considerar os resultados mais recentes do IPCC é de extrema importância (Horritt e Bates, 2002; IPCC, 2019). É necessário compreender as causas e a evolução das alterações climáticas e produzir projeções mais precisas para a sociedade de maneira a conseguir proteger vidas, bens e infraestruturas, garantindo o equilíbrio das zonas estuarinas/costeiras e produzindo informações para uma tomada de decisão eficaz que permita a adoção de políticas de mitigação e de adaptação. De forma a abranger uma ampla gama de futuros possíveis, com base nas emissões de gases de efeito estufa, o IPCC gerou quatro cenários (RPCs) para o século XXI, incluindo um cenário de mitigação (RCP 2.6), dois cenários intermédios (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário que ainda considera elevadas emissões de gases de efeito estufa (RCP 8.5). Os resultados destes cenários, que foram simulados em modelos climáticos globais e regionais (Coupled Model Intercomparison Project-CMIP: www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip) podem ser

utilizados para forçar os modelos numéricos estuarinos, permitindo representar, em simulações mais locais, o efeito das mudanças que o IPCC retrata, tais como a subida do nível do mar, variações na salinidade e na temperatura dos oceanos, e o aumento na frequência de eventos extremos, tais como cheias e tempestades com agitação marítima mais forte. No entanto, os resultados devem ser considerados com cuidado, pois estamos a falar de cenários possíveis, mas não exatos, definidos considerando a evolução da humanidade e das suas atividades. A título de exemplo, podemos considerar a subida do nível do mar na costa portuguesa, para a qual não parece existir uma tendência clara. Para diferentes locais e períodos, vários autores relatam valores de 1,3 mm/ano (Dias e Taborda, 1992), 1,9 mm/ano (Antunes, 2013) ou mesmo -0,7 mm/ano (Araújo *et al.*, 2013). Sendo estimado uma subida média global do nível do mar de 1 a 2 mm/ano, considera-se que o nível do mar possa apresentar tendências locais divergentes, crescentes ou decrescentes (IPCC, 2012). Para representar adequadamente o efeito da elevação do nível do mar sobre as condições hidrodinâmicas de uma determinada região, todas essas tendências devem ser avaliadas com cuidado e devidamente integradas nos modelos numéricos. Só assim poderão ser evitados/amortecidos os riscos associados a condições futuras, analisando as vulnerabilidades de cada sistema e promovendo políticas que permitam reduzir a exposição e aumentar a adaptação e a resiliência aos potenciais impactos adversos.

Conclusões

Os modelos numéricos são ferramentas complexas que, ao conseguirem representar o efeito combinado das marés, dos fluxos dos rios e da agitação marítima, podem ajudar a caracterizar as regiões estuarinas em termos de processos sedimentares/erosivos com efeitos na dinâmica topo-batimétrica, no risco de inundação, nas tendências de evolução, nos tempos de residência das massas de água e na distribuição da biota. Assim, permitem analisar e prever potenciais efeitos de intervenções antrópicas, de eventos extremos, e das alterações climáticas, nomeadamente da subida do nível do mar. Mas, como foi mostrado neste texto,

os efeitos destes cenários variam muito de área para área, já que dependem de vários fatores que definem não apenas o comportamento estuarino, mas também os seus ecossistemas e a distribuição da população. Estas relações e diferenças são destacadas comparando duas regiões estuarinas da costa norte de Portugal, com alguma proximidade geográfica, mas bastante diferentes: o estuário do Minho e o estuário do Douro. A comparação evidencia a necessidade de analisar cada região separadamente, considerando a configuração específica de cada estuário para a definição de protocolos de gestão, de forma a minimizar qualquer potencial vulnerabilidade e permitir a mitigação de riscos.

Contudo, como tem sido demostrado, os modelos numéricos também apresentam incertezas, sendo importante desenvolver técnicas que permitam melhorar as previsões. Neste sentido, surge o projeto EsCo-Ensembles, que visa aplicar uma nova metodologia baseada na construção de conjuntos de modelos, *ensembles*, por forma a melhorar os sistemas de previsão e alerta para regiões estuarinas. É proposta a implementação de uma metodologia que utilize as duas tipologias de *ensemble*, combinando os procedimentos utilizados com base em vários modelos diferentes com aqueles utilizados com *ensembles* construídos a partir de variações de um único modelo. Desta maneira consegue-se aumentar o número de membros do *ensemble* para que a incerteza na previsão diminua em relação a cada modelo individual.

Os resultados deste projeto permitirão conhecer a exposição e vulnerabilidade das áreas estuarinas do Douro e do Minho, e identificar e mapear as áreas mais sensíveis e vulneráveis, promovendo a sua preservação e proteção dos efeitos de eventos extremos e das alterações climáticas. O projeto produzirá e fornecerá informação valiosa às entidades responsáveis e outras partes interessadas, nomeadamente às autoridades, indústria, habitantes e à sociedade em geral. Fornecendo informações essenciais para o desenvolvimento de protocolos e estratégias de mitigação, para proteger os recursos naturais, populações e infraestruturas, e para potencializar novas infraestruturas marítimas e costeiras adaptadas aos eventos extremos futuros e às condições de alterações climáticas, o projeto contribuirá para o desenvolvimento de estratégias para uma gestão sustentável de áreas estuarinas e costeiras cada vez mais afetadas por pressões antropogénicas.

Agradecimentos

Esta publicação foi apoiada por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia, no âmbito dos projetos estratégicos UIDB/04423/2020 e UIDP/04423/2020, e pelo projeto *EsCo-Ensembles* (PTDC/ECI-EGC/30877/2017), cofinanciado pelo NORTE2020, pelo Portugal 2020 e pela União Europeia através do FEDER, e pela FCT através de fundos nacionais.

Referências bibliográficas

Ajami, N. K., Duan, Q., Gao, X., & Sorooshian, S. (2006). Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations: Application to distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 755-768. DOI: https://doi.org/10.1175/JHM519.1

Almeida, A., Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F., & Moura Paredes, G. (2009). Análise das marés meteorológicas em Leixões. In *6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 16 p.

Almeida, C. M. R., Mucha, A. P., & Vasconcelos, M. T. S. D. (2006). Comparison of the role of the sea club-rush Scirpus maritimus and the sea rush Juncus maritimus in terms of concentration, speciation and bioaccumulation of metals in the estuarine sediment. *Environmental Pollution,* 142 (1), 151-159. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.09.002

Antunes, C. (2013). Análise da Evolução do Nível Médio do Mar em Cascais. Entregável 1.1.6.a do Estudo do Litoral na Área de Intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo 2013. URL: https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Politicas/Agua/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E_1.1.6.a_Evoluao_NMM.pdf

Antunes do Carmo, J. S., Seabra Santos, F. J., Almeida, A. B. (1993). Numerical solution of the generalized Serre equations with the MacCormack finite difference scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 16, 725-738

APA (2012). Agência Portuguesa do Ambiente. Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Minho e Lima, RH1. URL: https://www.apambiente.pt/?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=834

Araújo, I. B., Bos, M. S., Bastos, L. C., & Cardoso, M. M. (2013). Analysing the 100 year sea level record of Leixões, Portugal. *Journal of Hydrology*, 481, 76-84. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.019

Avilez-Valente, P., & Seabra-Santos, F. J. (2009). A high-order Petrov-Galerkin finite element method for the classical Boussinesq wave model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids,* 59(9), 969-1010. DOI: https://doi.org/10.1002/fld.1846

Azevedo, I. C., Duarte, P. M., & Bordalo, A. A. (2008). Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(3), 620-633. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.07.034

Baeta, A., Vieira, L. R., Lírio, A. V., Canhoto, C., Marques, J. C., & Guilhermino, L. (2017). Use of stable isotope ratios of fish larvae as indicators to assess diets and patterns of anthropogenic nitrogen pollution in estuarine ecosystems. *Ecological Indicators*, 83, 112-121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.062

Bastos, L., Bio, A., & Iglesias, I. (2016). The importance of marine observatories and of RAIA in particular. *Frontiers in Marine Science*, *3*, 1-11.DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00140

Bastos, L., Bio, A., Pinho, J. L. S., Granja, H., & Jorge da Silva, A. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53-69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.05.017

Bates, J. Mm, & Granger, C. W. J. (1969). Combination of forecasts. *Operational Research Quarterly*, 20(4), 451-468

Bazell, D., & Aha, D. W. (2001). Ensembles of classifiers for morphological galaxy classification. *The Astrophysical Journal*, 548, 219-223. DOI: https://doi.org/10.1086/318696

Bell, J. E., Brown, C. L., Conlon, K., Herring, S., Kunkel, K. E., Lawrimore, J., Luber, G., Schreck, C., Smith, A., Uejio, C. (2017). Changes in extreme events and the potential impacts on human health. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(4), 265-287. DOI: https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1401017

Benediktsson, J. A., Chanussot, J., & Fauvel, M. (2007). Multiple classifier systems in remote sensing: from basics to recent developments. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4472, 501-512. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-72523-7_50

Bernhofen, M. V., Whyman, C., Trigg, M. A., Sleigh, P. A., Smith, A. M., Sampson, C. C., Yamazaki, D., Ward, P. J., Rudari, R., Pappenberger, F., Dottori, F., Salamon, P., Winsemius, H. C. (2018). A first collective validation of global fluvial flood models for major floods in Nigeria and Mozambique. *Environmental Research Letters*, 13(10), 104007. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae014

Buizza, R., Houtekamer, P. L., Toth, Z., Pellerin, G., Wei, M., & Zhu, Y. (2005). A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1076-1097. DOI: https://doi.org/10.1175/MWR2905.1

Cantelaube, P., & Terres, J. M. (2005). Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 57(3), 476-487. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2005.00125.x

Chakraborty, A., & Krishnamurti, T. N. (2006). Improved seasonal climate forecasts of the south Asian summer monsoon using a suite of 13 coupled ocean-atmosphere models. *Monthly Weather Review*, 134(6), 1697-1721. DOI: https://doi.org/10.1175/MWR3144.1

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., & Taveira-Pinto, F. (2009). Potential effects of climate change on northwest Portuguese coastal zones. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1497-1507.

Corti, S., & Pennati, V. (2000). A 3-D hydrodynamic model of river flow in a delta region. *Hydrological Processes*, 14, 1290-1298.

Costa-Dias, S., Machado, A., Teixeira, C., & Bordalo, A. A. (2018). Urban estuarine beaches and urban water cycle seepage: The influence of temporal scales. *Water*, 10(2), 1-11. DOI: https://doi.org/10.3390/w10020173

Dangendorf, S., Wahl, T., Hein, H., Jensen, J., Mai, S., & Mudersbach, C. (2012). Mean sea level variability and influence of the North Atlantic Oscillation on long-term trends in the German Bight. *Water*, 4(4), 170-195. DOI: https://doi.org/10.3390/w4010170

Das, D. M., Singh, R., Kumar, A., Mailapalli, D. R., Mishra, A., & Chatterjee, C. (2016). A multi-model ensemble approach for stream flow simulation. In *Modeling Methods and Practices in Soil and Water Engineering*, Chapter 4, 71-102. DOI: https://doi.org/10.1201/b19987-5

Delgado, A., Taveira-Pinto, F., & Silva, R. (2011). Hydrodynamic and morphodynamic preliminar simulation of river Minho estuary. *In 6ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*,113-126.

Demeritt, D., Cloke, H., Pappenberger, F., Thielen, J., Bartholmes, J., & Ramos, M. H. (2007). Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. *Environmental Hazards*, 7(2), 115-127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.05.001

Déqué, M., & Somot, S. (2010). Weighted frequency distributions express modelling uncertainties in the ENSEMBLES regional climate experiments. *Climate Research*, 44(2-3), 195-209. DOI: https://doi.org/10.3354/cr00866

DWD (2021). Deutscher Wetterdienst. Wetter und Klima aus einer Hand. URL: https://www.dwd.de/EN

Dias, J. A., & Taborda, R. (1992). Tidal gauge data in deducing secular trends of relative sea level and crustal movements in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 8(3), 655-659. URL: https://www.jstor.org/stable/4298014

Dias, J. M., Valentim, J. M., & Sousa, M. C. (2013). A numerical study of local variations in tidal regime of Tagus estuary, Portugal. *PLoS ONE*, 8(12), e80450. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080450

Dickinson, J. P. (1973). Some statistical results in the combination of forecasts. *Operational Research Quarterly*, 24(2), 253-260. DOI: https://doi.org/10.1057/jors.1973.42

Domínguez García, M. D., Horlings, L., Swagemakers, P., & Simón Fernández, X. (2013). Place branding and endogenous rural development. Departure points for developing an inner brand of the River Minho estuary. *Place Branding and Public Diplomacy*, 9(2),124-140. DOI: https://doi.org/10.1057/pb.2013.10

Epstein, E. S. (1969). Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 21(6), 739-759. DOI: https://doi.org/10.3402/tellusa.v21i6.10143

Jones, J. E., & Davies, A. M. (2010). Application of a finite element model to the computation of tides in the Mersey Estuary and Eastern Irish Sea. *Continental Shelf Research*, 30(5), 491-514. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.01.003

Fan, Y. M., Pan, S., Chen, J. M., & Kao, C. C. (2013). Ensemble wave forecasting over typhoon period. *In OCEANS 2013 MTS/IEEE Bergen: The Challenges of the Northern Dimension,* 1-7. DOI: https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608029

Feng, J., Lee, D. K., Fu, C., Tang, J., Sato, Y., Kato, H., Mcgregor, J. L., Mabuchi, K. (2011). Comparison of four ensemble methods combining regional climate simulations over Asia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 111(1), 41-53. DOI: https://doi.org/10.1007/s00703-010-0115-7

Ferreira, J., Abreu, P., Bettencourt, A., Bricker, S., Marques, J., Melo, J., Newton, A., Nobre, A., Patricio, J., Rocha, F., Rodrigues, R., Salas, F., Silva, M. C., Simas, T., Soares, C. V., Stacey, P. E., Vale, C., de Wit, M., Wolff, W. (2005). *Monitoring Plan for Portuguese Coastal Waters. Water Quality and Ecology. Development of Guidelines for the Applications of the European Union Water Framework Directive,* 141 p.

Freitas, V., Costa-Dias, S., Campos, J., Bio, A., Santos, P., & Antunes, C. (2009). Patterns in abundance and distribution of juvenile flounder, Platichthys flesus, in Minho estuary (NW Iberian Peninsula). *Aquatic Ecology*, 43(4), 1143-1153. DOI: https://doi.org/10.1007/s10452-009-9237-8

Gama, C., Alveirinho Dias, J. M., Ferreira, O., & Taborda, R. (1994). Analysis of storm surge in Portugal between June 1986 and May 1988. *Proceedings of Littoral 94*, 381-387.

Georgakakos, K. P., Seo, D. J., Gupta, H., Schaake, J., & Butts, M. B. (2004). Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty through multimodel ensembles. *In Journal of Hydrology*, 298, 222-241. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.037

Gneiting, T., & Raftery, A. E. (2005). Weather forecasting with ensemble methods. *Science*, 310(5746), 248-249. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1115255

Gomes, M. P., Pinho, J. L., Antunes do Carmo, J. S., & Santos, L. (2015). Hazard assessment of storm events for The Battery, New York. *Ocean and Coastal Management,* 118, 22-31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.006

Gouveia, V., Almeida, C. M. R., Almeida, T., Teixeira, C., & Mucha, A. P. (2018). Indigenous microbial communities along the NW Portuguese Coast: Potential for hydrocarbons degradation and relation with sediment contamination. *Marine Pollution Bulletin*, 131(A), 620-632. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.063

Granja, H., Bastos, L., Pinho, J., Gonçalves, J., Henriques, R., Bio, A., Mendes., J., Magalhães, C. (2011). Integração de metodologias no estabelecimento de um programa de monitorização costeira para avaliação de risco. In *VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, 11 p.

Gravato, C., Guimarães, L., Santos, J., Faria, M., Alves, A., & Guilhermino, L. (2010). Comparative study about the effects of pollution on glass and yellow eels (Anguilla anguilla) from the estuaries of Minho, Lima and Douro Rivers (NW Portugal). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(4), 524-533. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.11.009

Guimarães, L., Gravato, C., Santos, J., Monteiro, L. S., & Guilhermino, L. (2009). Yellow eel (Anguilla anguilla) development in NW portuguese estuaries with different contamination levels. *Ecotoxicology*. 18, 385–402. DOI: https://doi.org/10.1007/s10646-008-0294-x

Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F. J., & Palmer, T. N. (2005). The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - I. Basic concept. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 57(3),219-233. DOI: https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i3.14657

Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., & Corfee-Morlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 3, 802–806. DOI: https://doi.org/10.1038/nclimate1979

Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, *268*(1–4), 87–99. DOI: https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00121-X

Iglesias, I., Almeida, C. M. R., Teixeira, C., Mucha, A. P., Magalhães, A., Bio, A., & Bastos, L. (2020). Linking contaminant distribution to hydrodynamic patterns in an urban estuary: The Douro estuary test case. *Science of the Total Environment*, *707*, 135792. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135792

Iglesias, I., Venâncio, S., Pinho, J. L., Avilez-Valente, P., & Vieira, J. M. P. (2018a). Two models solutions for the Douro estuary: Flood risk assessment and breakwater effects. *Estuaries and Coasts*. 42(2), 348-364. DOI: https://doi.org/10.1007/s12237-018-0477-5

Iglesias, I, Avilez-Valente, P., Bio, A., & Bastos, L. (2018b). Numerical modelling simulations of the Minho estuary hydrodynamics. In *IX Simpósio Ibérico sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Minho*, 25 p.

Iglesias, I, Venancio, S., Peixoto, R., Pinho, J., Avilez-Valente, P., & Vieira, J. (2016). The Douro estuary: Modelling comparison for floods prevention. In I. Hidrográfico (Ed.), *Actas das 4.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica,* 159–162. Lisbon: Instituto Hidrográfico.

Iglesias, I., Avilez-Valente, P., Bio, A., & Bastos, L. (2019a). Modelling the main hydrodynamic patterns in shallow water estuaries: The Minho case study. *Water*, *11*(5), 1040. DOI: https://doi.org/10.3390/w11051040

Iglesias, I., Avilez-Valente, P., Pinho, J. L., Bio, A., Vieira, J. M., Bastos, L., & Veloso-Gomes, F. (2019b). Numerical modeling tools applied to estuarine and coastal hydrodynamics: A user perspective. In J. S. Antunes do Carmo (Ed.), *Coastal and Marine Environments - Physical Processes and Numerical Modelling*, IntechOpen, 20 p. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.85521

IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Summary for Policymakers*. (C. Field, V. Barros, T. Stocker, D. Qin, D. Dokken, K. Ebi, … P. Midgley, Eds.). Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC (2021). https://www.ipcc.ch/

IPCC (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. URL: https://www.ipcc.ch/srocc/

Krishnamurti, T. N., Kishtawal, C. M., LaRow, T. E., Bachiochi, D. R., Zhang, Z., Eric Williford, C., Gadgil, S. Surendran, S. (1999). Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, 285(5433), 1548-155. DOI: https://doi.org/10.1126/science.285.5433.1548

Kumar, A., Mitra, A. K., Bohra, A. K., Iyengar, G. R., & Durai, V. R. (2012). Multi-model ensemble (MME) prediction of rainfall using neural networks during monsoon season in India. *Meteorological Applications*, *19*(2), 161–169. DOI: https://doi.org/10.1002/met.254

Leigh, W., Purvis, R., & Ragusa, J. M. (2002). Forecasting the NYSE composite index with technical analysis, pattern recognizer, neural network, and genetic algorithm: A case study in romantic decision support. *Decision Support Systems*, 32(4), 361-377. DOI: https://doi.org/10.1016/S0167-9236(01)00121-X

Leith, C. E. (1974). Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Monthly Weather Review*, 102(6), 409-418. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1974)102<0409:tsomcf>2.0.co;2

Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2), 130-141. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:dnf>2.0.co;2

Lorenz, E. N. (1965). A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus,* 17(3), 321-333. DOI: https://doi.org/10.3402/tellusa.v17i3.9076

Melo, W., Pinho, J., Iglesias, I., Bio, A., Avilez-Valente, P., Vieira, J., Bastos, L., Veloso-Gomes, F. (2020). Hydro- and morphodynamic impacts of sea level rise: The Minho estuary case study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 441. DOI: https://doi.org/10.3390/JMSE8060441

Menahem, E., Shabtai, A., Rokach, L., & Elovici, Y. (2009). Improving malware detection by applying multi-inducer ensemble. *Computational Statistics and Data Analysis*, 53(4), 1483-1494. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csda.2008.10.015

Mesquita, A., Avilez-Valente, P., & Tavares-Pinho, F. (2009). Turbulência e rebentação sobre quebramares submersos. *In METNUM 2009,* 29 Jun-2 Jul 2009, Barcelona, 20 p. ISBN: 78-84-96736-66-5.

Mil-Homens, M., Costa, A. M., Fonseca, S., Trancoso, M. A., Lopes, C., Serrano, R., & Sousa, R. (2013). Characterization of heavy-metal contamination in surface sediments of the Minho river estuary by way of factor analysis. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *64*(4), 617-631. DOI: https://doi.org/10.1007/s00244-012-9861-5

Monteiro, I. O., Marques, W. C., Fernandes, E. H., Gonçalves, R. C., & Möller, O. O. (2011). On the effect of earth rotation, eiver discharge, tidal oscillations, and wind in the dynamics of the Patos lagoon coastal plume. *Journal of Coastal Research*, 27(1988), 120-130. DOI: https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00168.1

Moser, S. C., Davidson, M. A., Kirshen, P., Mulvaney, P., Murley, J. F., Neumann, J. E., Petes, L., Reed, D. (2014). Coastal zone development and ecosystems. *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*, 579-618. DOI: https://doi.org/10.7930/J0MS3QNW

Mucha, A. P., Bordalo, A. A., & Vasconcelos, M. T. S. D. (2004). Sediment quality in the Douro river estuary based on trace metal contents, macrobenthic community and elutriate sediment toxicity test (EST'T). *Journal of Environmental Monitoring*, 6(7), 585-592. DOI: https://doi.org/10.1039/b401855a

Newbold, P., & Granger, C. W. J. (1974). Experience with forecasting univariate time series and the combination of forecasts. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 137(2),131-165. DOI: https://doi.org/10.2307/2344546

Palmer, T. N., Doblas-Reyes, F. J., Hagedorn, R., & Weisheimer, A. (2005). Probabilistic prediction of climate using multi-model ensembles: From basics to applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360, 1991-1998. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1750

Panayotis, P. (2016). Modelling coastal hydrodynamics. URL: http://www.coastalwiki.org/wiki/Modelling_coastal_hydrodynamics

Peixoto, J., & Pinho, J. (2013). Modelação hidrodinâmica do estuário do rio Douro. *In Proceedings of Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 25-28.

Peixoto, R. (2016). *Modelação Hidrodinâmica do Estuário do Douro: Cenários de Cheia e Influência dos Novos Molhes (Tese de Mestrado*). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Pereira, H. (2016). *Coupled Modelling of the Minho and Lima Estuaries: Hydrological Response to Climate Changes (Tese de Mestrado*). Universidade de Aveiro.

Pinho, J. L., & Vieira, J. (2007). Mathematical modelling of salt water intrusion in a northern portuguese estuary. *In* Lobo Ferreira & J. Vieira (Eds.), *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHR, 277-287.

Pinho, J. L., Ferreira, R., Vieira, L., & Schwanenberg, D. (2015). Comparison between two hydrodynamic models for flooding simulations at river Lima basin. *Water Resources Management,* 29, 431-444. DOI: https://doi.org/10.1007/s11269-014-0878-6

Polikar, R., Topalis, A., Parikh, D., Green, D., Frymiare, J., Kounios, J., & Clark, C. M. (2008). An ensemble based data fusion approach for early diagnosis of Alzheimer's disease. *Information Fusion*, 9(1), 83-95. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2006.09.003

Portela, L. I. (2008). Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Geo-Marine Letters*, 28(2), 77-86. DOI: https://doi.org/10.1007/s00367-007-0091-1

Portela, L. I. (2011). Morphological evolution, hydrodynamics and sediment dynamics of the Minho River estuary. In *3.º Seminário sobre Gestão de Bacias Hidrográficas. "Os Estuários"*, 6 p.

Putra, S. S., Wegen, M. v.d., Reyns, J., Dam, A. v., Solomatine, D. P., & Roelvink, J. A. (2015). Multi station calibration of 3D flexible mesh model: A case study of the Columbia estuary. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 297-306. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.038

Radović, V., & Iglesias, I. (2019). Extreme weather events: definition, classification and guidelines towards vulnerability reduction and adaptation management. *In*: Leal Filho W., Azul A., Brandli L., Özuyar P., Wall T. (eds) *Climate Action. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer, Cham, 13 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71063-1_68-1

Re, M. & Valentini, G. (2010). Simple ensemble methods are competitive with state-of-the-art data integration methods for gene function prediction. *Journal of Machine Learning Research, Proceedings of the third International Workshop on Machine Learning in Systems Biology, PMLR*, 8, 98-111.

Reis, J. L., Martinho, A. S., Pires-Silva, A. A., & Silva, A. J. (2009). Assessing the influence of the river discharge on the Minho estuary tidal regime. *Journal of Coastal Research*, 2009(56), 1405-1409.

Ribeiro, D. C., Costa, S., & Guilhermino, L. (2016). A framework to assess the vulnerability of estuarine systems for use in ecological risk assessment. *Ocean and Coastal Management*, 119, 267-277. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.022

Robins, P. E., & Davies, A. G. (2010). Morphological controls in sandy estuaries: The influence of tidal flats and bathymetry on sediment transport. *Ocean Dynamics*, 60(3), 503-517. DOI: https://doi.org/10.1007/s10236-010-0268-4

Roy Bhowmik, S. K., & Durai, V. R. (2008). Multi-model ensemble forecasting of rainfall over Indian monsoon region. *Atmosfera*, 21, 225-239.

Roy Bhowmik, S. K., & Durai, V. R. (2010). Application of multimodel ensemble techniques for real time district level rainfall forecasts in short range time scale over Indian region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 106, 19-35. DOI: https://doi.org/10.1007/s00703-009-0047-2

Rozante, J., Moreira, D., Godoy, R., & Fernandes, A. (2014). Multi-model ensemble: technique and validation. *Geoscientific Model Development*, 7, 2333-2343. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-7-2333-2014

Santos, I., Teodoro, A., & Taveira-Pinto, F. (2010). Análise da evolução morfológica da restinga do rio Douro. In *5as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*, Porto, 14 p.

Sousa, M. C., Vaz, N., Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., & Dias, J. M. (2014). Modeling the Minho river plume intrusion into the rias baixas (NW Iberian Peninsula). *Continental Shelf Research*, 85, 30-41. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.06.004

Sousa, R., Guilhermino, L., & Antunes, C. (2005). Molluscan fauna in the freshwater tidal area of the River Minho estuary, NW of Iberian Peninsula. *Annales de Limnologie – International Journal of Limnology*, 41(2), 141-147. DOI: https://doi.org/10.1051/limn/2005009

Sutherland, J., Walstra, D. J. R., Chesher, T. J., van Rijn, L. C., & Southgate, H. N. (2004). Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51(2), 119-142. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.12.003

Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365, 2053-2075. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*, 90, 201-216. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006

Teodoro, A. C., Pais-Barbosa, J., Gonçalves, H., Veloso-Gomes, F., & Taveira-Pinto, F. (2011). Extraction of Cabedelo sand spit area (Douro estuary) from satellite images through image processing techniques. *Journal of Coastal Research* SI, 64(64), 1740-1744.

Thompson, P. D. (1977). How to improve accuracy by combining independent forecasts. *Monthly Weather Review,* 105(2), 228-229. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<0228:htiabc>2.0.co;2

Thomson, M. C., Doblas-Reyes, F. J., Mason, S. J., Hagedorn, R., Connor, S. J., Phindela, T., Morse, A. P., Palmer, T. N. (2006). Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. *Nature*, 439, 576-579. DOI: https://doi.org/10.1038/nature04503

Thornhill, G. D., Mason, D. C., Dance, S. L., Lawless, A. S., Nichols, N. K., & Forbes, H. R. (2012). Integration of a 3D variational data assimilation scheme with a coastal area morphodynamic model of Morecambe Bay. *Coastal Engineering*, 69, 82-96. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.05.010

van Maren, D. S., van Kessel, T., Cronin, K., & Sittoni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95, 1-14. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.010

Veloso-Gomes, F. (2016). Zonas costeiras: Variabilidade climática, ações antropogénicas e alterações climáticas. In *II Congresso Ibero Americano de Gestão Integrada de Áreas Litorais*, 757-758.

Viney, N. R., Bormann, H., Breuer, L., Bronstert, A., Croke, B. F. W., Frede, H., Gräff, T., Hubrechts, L., Huisman, J. A., Jakeman, A.J., Kite, G. W., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D. P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., Willems, P. (2009). Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) II: Ensemble combinations and predictions. *Advances in Water Resources*, 32(2), 147-158. DOI: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.05.006

Vose, R. S., Applequist, S., Bourassa, M. A., Pryor, S. C., Barthelmie, R. J., Blanton, B., Bromirski, P. D., Brooks, H. E., DeGaetano, A. T., Dole, R. M., Easterling, D. R., Jensen, R. E., Karl, T. R., Katz, R. W., Klink, K., Kruk, M. C., Kunkel, K. E., MacCracken, M. C., Peterson, T.C., Shein, K., Thomas, B. R., Walsh, J. E., Wang, X. L., Wehner, M. F., Wuebbles, D. J. Young, R. S. (2014). Monitoring and understanding changes in extremes: Extratropical storms, winds, and waves. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(3), 377-386. DOI: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00162.1

Weigel, A. P., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2007). Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134, 241-260

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2012). *Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting*. Geneva. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1091_en.pdf

Woodcock, F., & Engel, C. (2005). Operational consensus forecasts. *Weather and Forecasting*, 20(1), 101-111. DOI: https://doi.org/10.1175/WAF-831

Zacarias, N. G. (2007). *Influência da Batimetria e do Caudal Fluvial na Propagação da Maré no Estuário do Rio Minho (Tese de Mestrado).* Universidade de Évora.

SÉRIE
ESTUDOS CINDÍNICOS

Títulos Publicados:

1 *Incêndios em Estruturas. Aprender com o Passado;*

2 *Educação para a Redução dos Riscos;*

3 *Metodologia de Análise de Riscos através de Estudos de Casos;*

4 *Riscos Hidrometeorológicos;*

5 *Pluralidade na Diversidade de Riscos;*

6 *Risco Sísmico - Aprender com o Passado;*

7 *Territórios em Risco;*

8 *Resiliência ao Risco;*

9 *Madeira Região Resiliente - Aprender com o Passado;*

10 *Risco de Cheias e Risco de Inundações Fluviais - Aprender com o Passado;*

11 *Análise e modelação de risco no ordenamento do território.*

Tomos em preparação:

12 *Perceção e planeamento na redução e gestão do risco de catástrofess;*

13 *As paisagens dos riscos sociais. Educar para diminuir a vulnerabilidade*;

14 *Risco de Movimentos em Vertentes - Aprender com o Passado;*

15 *Os Riscos e a Energia;*

16 *Efeitos dos Incêndios Florestais nos Solos de Portugal.*

Adélia Nunes é Professora Associada, com Agregação em Geografia, na Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, onde exerce funções de docência e investigação. Ingressou na carreira docente universitária em 1999. Em 2001 concluiu o Mestrado em Geografia Física e em 2007 o Doutoramento em Geografia.

É Diretora do Departamento de Geografia e Turismo, da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, membro integrado do Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), da RISCOS (Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança) e do NICIF (Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais).

Dinâmica da paisagem, riscos naturais e mistos e gestão de recursos naturais são as principais áreas de investigação, tendo publicado várias dezenas de trabalhos, onde se incluem capítulos de livros e artigos em revistas de especialidade. Desde 2008 colabora no Mestrado em Ensino de Geografia e em 2017 assumiu a Coordenação do Mestrado em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território.

Foi editora convidada de um número especial no *Journal of Sustainability* **(***Natural Risk Perception and Geography Education***) e no** *Journal of Applied Sciences* **(***Wildland-Urban Interface e Risk of Wildfires***). Participou em projectos de investigação, nacionais e internacionais, dedicados à avaliação dos impactes das mudanças do uso do solo na resposta hidrogeomorfológica dos solos e análise do risco de incêndios florestal nas áreas de interface urbano-florestal.**

Esteve envolvida na organização de inúmeras conferências nacionais e internacionais.

Luciano Lourenço é doutorado em Geografia Física, pela Universidade de Coimbra, onde se jubilou como Professor Catedrático.

É Diretor do NICIF - Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais, da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

Atualmente desempenha funções de Presidente da Mesa da Assembleia Geral em várias Associações, designadamente:

- **RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança;**
- **COBALCO - Associação para Cooperação entre Baldios do Distrito de Coimbra;**
- **ADGou - Associação de Desenvolvimento do Goulinho;**
- **INSP - Irmandade de Nossa Senhora das Preces.**

É, ainda, Presidente da Direção da:

- **ASSOAÇOR - Associação dos Baldios da Serra do Açor;**
- **CLBGCC - Comunidade Local do Baldio do Goulinho e Casal Cimeiro.**

Exerceu funções de Diretor-Geral da Agência para a Prevenção de Incêndios Florestais e de Presidente da Direção da Escola Nacional de Bombeiros.

Consultor científico de vários organismos e de diversas revistas científicas, nacionais e estrangeiras, publicou mais de uma centena de artigos em revistas especializadas. Possui mais de 80 capítulos de livros e mais de 50 livros publicados. Organizou mais de uma centena de eventos científico-pedagógicos e participou com apresentação de 350 comunicações. Orientou e coorientou várias teses de doutoramento e dissertações de mestrado.

Foi investigador responsável de mais de 40 projetos, nacionais e internacionais. Nas suas atividades profissionais interagiu com centenas de colaboradores, designadamente com cerca de 300 em coautorias de trabalhos científicos.

RISCOS

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
DE RISCOS, PREVENÇÃO
E SEGURANÇA

estudos
CINDÍNICOS