



Avaliação do Risco de Inundação Com Vista à Melhoria da Resiliência Territorial da Região da Ria de Aveiro

PAT2030-FEDER-00337900



Relatório Final

23 de dezembro de 2024



Equipa Técnica

A Equipa Técnica responsável pelo desenvolvimento deste Estudo é composta por profissionais com competências nas áreas técnicas e científicas que se consideram adequadas para a sua elaboração.

Função no Projeto		Enquadramento nas Atividades do Estudo
João Miguel Dias	Coordenador do Estudo	Responsável por coordenar a Equipa Técnica e estabelecer a ligação entre a academia e os utilizadores finais. Responsável pelo cumprimento das tarefas no prazo estabelecido e pela elaboração dos relatórios.
Carina Lopes	Membro da Equipa	Apoio e supervisão às atividades inerentes à avaliação do risco de inundação através da abordagem Fonte-Percorso-Recetor, apoio técnico às atividades do módulo “Recetor”, e elaboração de relatórios.
Magda Sousa	Membro da Equipa	Apoio técnico às atividades do módulo “Percorso” e apoio às ações de divulgação, e elaboração de relatórios.
Nuno Vaz	Membro da Equipa	Apoio técnico às atividades do módulo “Percorso” e apoio às ações de divulgação, e elaboração de relatórios.
Américo Ribeiro	Membro da Equipa	Apoio técnico às atividades dos módulos “Fonte” e “Percorso”, e elaboração de relatórios.
Ana Picado	Membro da Equipa	Apoio técnico às atividades dos módulos “Fonte” e “Recetor”, apoio às ações de divulgação, e elaboração de relatórios.

Resumo

A região da Ria de Aveiro apresenta elevada suscetibilidade a inundações, sendo frequentemente atingida por eventos severos cujas consequências ambientais e socioeconómicas se têm vindo a agravar nas últimas décadas. O projeto InundaRia desenvolveu uma análise rigorosa e detalhada da dinâmica de inundações na Ria de Aveiro e da eficiência de medidas estruturais na redução da extensão de inundações, munindo os utilizadores e decisores políticos da região de previsões fidedignas fundamentais à preparação do território para eventos extremos e para o impacto das alterações climáticas, tornando-o mais resiliente às ameaças futuras. A avaliação do risco de inundação seguiu a metodologia Fonte – Percurso – Recetor que compreende: 1) a caracterização dos agentes causadores de inundações através de análises estatísticas dos dados existentes; 2) a delimitação do percurso de inundação através de modelação hidrodinâmica; 3) a identificação dos elementos socioeconómicos expostos ao perigo de inundação sobrepondo a extensão de inundação com informação territorial. Os resultados revelaram que o aumento do nível de maré e do nível médio do mar intensificarão os níveis extremos do mar, agravando os efeitos das inundações de origem marinha na região da Ria de Aveiro. Os territórios de uso agrícola e artificializados são os mais afetados, prevendo-se que o número de residentes diretamente afetados por eventos de origem marinha com 100 anos de período de retorno seja de 2450, e que este número aumente para 4437 até 2045 devido à subida do nível médio mar. O impacto dos eventos de origem fluvial está praticamente circunscrito aos territórios agrícolas e pastagens adjacentes à foz dos rios que desaguardam na laguna, tendo estes eventos influência reduzida nos territórios artificializados. Concluiu-se que sistema de defesa contra as marés que se encontra em fase de conclusão protege os campos agrícolas do Baixo Vouga Lagunar de inundações de origem marinha. Este estudo salienta ainda que a metodologia desenvolvida é eficiente na avaliação rigorosa do risco de inundação e recomenda-se a sua aplicação aos sistemas estuarinos portugueses identificados como Áreas de Risco Potencial Significativo de Inundação (ARPSI). Adicionalmente, o envolvimento dos agentes de proteção civil, gestores do território e comunidade local no processo de criação e validação da cartografia de inundação aumentou a confiança e aceitação nos resultados obtidos através deste projeto.

Índice

Resumo.....	3
Índice de Figuras.....	6
Índice de Tabelas	8
1 Enquadramento metodológico	9
1.1 Enquadramento e objetivos.....	9
1.2 Descrição das atividades e ações desenvolvidas.....	10
1.2.1 Atividade 1 – Avaliação do risco de inundação	11
1.2.2 Atividade 2 – Medidas de adaptação	12
1.2.3 Atividade 3 – Elaboração de relatórios	12
1.2.4 Atividade 4 – Discussão, demonstração e disseminação	13
1.3 Grau de cumprimento da operação e justificação de eventuais desvios.	15
2 Estudo	16
2.1 Metodologia	16
2.1.1 Caracterização dos agentes causadores de inundações	16
2.1.1.1 Maré astronómica, maré meteorológica e níveis do mar extremos	17
2.1.1.2 Nível médio do mar	19
2.1.1.3 Agitação marítima.....	19
2.1.1.4 Caudal fluvial.....	20
2.1.2 Avaliação do risco de inundação.....	20
2.1.2.1 Implementação do modelo hidrodinâmico.....	20
2.1.2.2 Simulações numéricas.....	23
2.2 Resultados.....	27
2.2.1 Agentes causadores de inundações	27
2.2.1.1 Maré astronómica, maré meteorológica e níveis de mar extremos	27

2.2.1.2	Nível médio do mar	29
2.2.1.3	Agitação marítima.....	30
2.2.1.4	Caudal fluvial	31
2.2.2	Cartografia de inundação	32
2.2.2.1	Cenários Climáticos.....	32
2.2.2.2	Medidas estruturais	37
3	Principais Conclusões	43
	Referências	46

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Cronograma das atividades realizadas, datas de realização dos workshops (WS1, WS2 e WS3) e entrega dos relatórios (R1, R2, R3).	11
Figura 1.2 - Policy-brief do projeto.	13
Figura 1.3 - Logótipo do projeto.	14
Figura 1.4 - QR code para o acesso ao website e às redes sociais.	14
Figura 1.5 - Flyer de divulgação do 1º workshop do projeto.	14
Figura 1.6 - Cartaz de divulgação do 2º workshop do projeto.	15
Figura 2.1 - Modelo digital de terreno (MDT) interpolado para a grelha numérica do Delft3D e localização dos 2D weirs.	22
Figura 2.2 - Cenários de medidas estruturais: a) Conf.1, b) Conf.2, c) Conf.3, d) Conf.4 e e) Conf.5.	26
Figura 2.3 - Variação anual do nível (m): a) de preia-mar máxima (PMMax), b) de preia-mar de águas vivas (PMAV), c) Variação anual do nível (m) de preia-mar de águas mortas (PMAM), d) de baixa-mar de águas mortas (BMAM), e) de baixa-mar de águas vivas (BMAV), e) Variação anual do nível (m) de baixa-mar mínima (BMMin).	28
Figura 2.4 - Variação anual da amplitude de maré (m) em: a) situação de maré viva, b) em situação de maré morta.	28
Figura 2.5 - a) altura máxima anual da maré meteorológica (m) e b) distribuição empírica e função de distribuição cumulativa teórica GEV.	28
Figura 2.6 - a) Variação anual do nível médio do mar (m). b) Evolução da subida do nível médio do mar (m) na costa Oeste de Portugal até 2100.	30
Figura 2.7 - Direção média para o período (a) histórico (1979-2005), (b) futuro próximo (2026-2045) e (c) longínquo (2081-2100).	30
Figura 2.8 - Mapas de extensão de inundação para eventos de origem marinha (a), fluvial (b) e combinada (c) para o clima presente.	33
Figura 2.9 - Mapas de extensão de inundação para eventos de origem marinha (a), fluvial (b) e combinada (c) para o clima futuro.	33
Figura 2.10 - Mapas de profundidade de inundação para os cenários AC1(a), AC2 (b), AC3 (c), AC4 (d) e AC5 (e).	34
Figura 2.11 - Mapas de profundidade de inundação para os cenários FC1(a), FC2 (b), FC3 (c), FC4 (d) e FC5 (e).	35
Figura 2.12 - a) Áreas de inundação de diferentes usos do solo para cada evento de inundação do clima atual. b) Taxa de aumento para cada evento do clima futuro relativamente ao correspondente do clima atual.	37

Figura 2.13 - Mapa de extensão de inundação com implementação de medidas de defesa para o Baixo Vouga Lagunar, para eventos de origem marinha (a, b, c) e combinada (d, e).....	38
Figura 2.14 - Mapas de extensão de inundação com implementação da obra de reforço da margem sul do Rio Novo do Príncipe para eventos de origem marinha (a, b, d, e) e combinada (c, f).	39
Figura 2.15 - Mapas de extensão de inundação com implementação do muro de contenção no Porto de Pesca do Largo de Aveiro para eventos de origem marinha (a, b) e combinada (c, d).....	40
Figura 2.16 - Mapas de extensão de inundação com implementação do novo terminal portuário na baía de São Jacinto para eventos de origem marinha (a, b, d, e) e combinada (c, f).	41
Figura 2.17 - Mapas de extensão de inundação com a implementação de rotura do cordão dunar a sul da Praia do Labrego para eventos de origem marinha (a, b) e combinada (c, d).....	42

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Descrição dos níveis de interesse para a maré astronómica (Fonte: Instituto Hidrográfico: https://www.hidrografico.pt/m.mare).....	17
Tabela 2.2 - Detalhes dos cenários SSP do 6º relatório do IPCC.	19
Tabela 2.3 - Cenários combinando forçamentos de origem oceânica e fluvial.....	24
Tabela 2.4 - Cenários de medidas estruturais.	25
Tabela 2.5 - Nível de maré meteorológica (m) para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.....	28
Tabela 2.6 - Níveis do mar extremos (m) para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.....	29
Tabela 2.7 - Previsões de subida do nível médio do mar (m) para a costa Oeste de Portugal.	30
Tabela 2.8 - Altura significativa, período de pico e direção média para os diferentes períodos. Altura significativa e período de pico para períodos de retorno de 10, 25 e 100 anos.....	31
Tabela 2.9 - Caudal (m^3/s) para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos para os afluentes da Ria de Aveiro em condições de clima atual e futuro.....	31
Tabela 2.10 - Área marginal inundada (km^2) e população residente diretamente afetada para os diferentes cenários.....	36

1 Enquadramento metodológico

1.1 Enquadramento e objetivos

Este relatório final é elaborado no âmbito da operação PAT2030-FEDER-00337900 “InundaRia: Avaliação do Risco de Inundação Com Vista à Melhoria da Resiliência Territorial da Região da Ria de Aveiro”. O projeto InundaRia teve como principal objetivo congregar e divulgar o conhecimento técnico-científico desenvolvido pela equipa técnica nos domínios da modelação hidrodinâmica e avaliação do risco de inundações em sistemas estuarinos, e elaborar um estudo temático que apresente uma análise rigorosa e detalhada da dinâmica de inundações na Ria de Aveiro, munindo os utilizadores e decisores políticos da região de previsões fidedignas fundamentais à preparação do território para eventos extremos, tornando-o mais resiliente às ameaças futuras.

Os objetivos específicos do projeto foram:

1. agregar o conhecimento técnico e científico desenvolvido pela equipa técnica nos domínios da modelação hidrodinâmica e avaliação do risco de inundações na Ria de Aveiro, e elaborar um estudo técnico-científico que apresenta uma análise rigorosa e detalhada da dinâmica e risco de inundações na Ria de Aveiro durante eventos extremos em cenários evolutivos futuros;
2. capacitar os decisores e gestores do território e serviços de emergência de previsões credíveis de inundação, permitindo que estes adequem o planeamento e gestão do território aos riscos de inundação, contribuindo para a melhoria contínua dos processos de decisão das políticas públicas e gestão de meios durante catástrofes;
3. promover sinergias entre a academia e as entidades gestoras do território, efetivando a transferência de conhecimento criado na academia em prol do desenvolvimento sustentável da região, e melhorando as condições de segurança de toda a comunidade abrangida pelo território da Ria de Aveiro;
4. envolver toda comunidade local nas ações de comunicação e divulgação do projeto de forma a aumentar, por um lado a consciencialização da população para os efeitos adversos de ações antropogénicas e alterações climáticas no risco de inundação, e por outro lado contribuindo

para aumentar preparação da comunidade a eventos extremos de inundação;

5. avaliar através de modelação hidrodinâmica a eficiência de medidas estruturais na mitigação do risco de inundação e promover o debate e discussão de soluções que aumentem a resiliência do território às ameaças crescentes provocadas pelos eventos extremos inundação.

Este relatório final do projeto InundaRia visa o cumprimento das metas estabelecidas no aviso e descritas na memória descritiva em fase de candidatura, sistematizando toda a informação pertinente associada ao estudo em questão, bem como o conhecimento gerado e utilizável pelos destinatários do estudo. Destaca-se que a escrita do relatório seguiu as normas indicadas no Anexo A – 3 Estrutura Tipo do Relatório Final do aviso de abertura, destacando-se os seguintes pontos da sua estrutura:

- Enquadramento metodológico: exposição do âmbito e principais objetivos do estudo; descrição das atividades e ações desenvolvidas e seu relacionamento com a concretização dos objetivos da operação; grau de cumprimento da operação e justificação de eventuais desvios.
- Estudo: descrição detalhada do estudo, designadamente da metodologia adotada e dos resultados obtidos.
- Principais conclusões: identificação das principais conclusões e recomendações que decorrem do trabalho realizado.

1.2 Descrição das atividades e ações desenvolvidas

O estudo-temático realizado teve a duração de 9 meses e incluiu a execução de 4 atividades: 1) Avaliação do Risco de Inundação; 2) Medidas de Adaptação; 3) Elaboração de Relatórios; 4) Discussão, demonstração e disseminação, em conformidade com a calendarização apresentada na Figura 1.1.

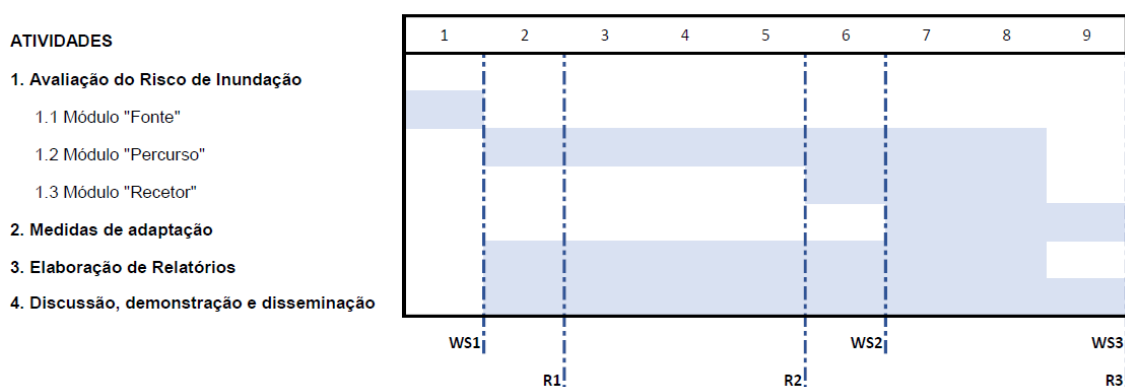


Figura 1.1 - Cronograma das atividades realizadas, datas de realização dos *workshops* (WS1, WS2 e WS3) e de entrega dos relatórios (R1, R2, R3).

1.2.1 Atividade 1 – Avaliação do risco de inundação

A atividade 1 descreve os trabalhos subjacentes à avaliação do risco de inundação através da aplicação da metodologia Fonte - Percurso – Recetor. Trata-se de uma abordagem multidisciplinar, já aplicada com sucesso pela Equipa Técnica desta proposta (Lopes, 2016; Lopes et al., 2017, 2022), que integra 3 módulos: Módulo Fonte – dedicada à análise dos agentes causadores de inundações e à definição de cenários de eventos extremos; Módulo Percurso – modelação numérica das características de inundação ao longo da Ria de Aveiro; Módulo Recetor – identificação dos elementos socioeconómicos expostos ao perigo de inundação.

As ações desenvolvidas no âmbito desta atividade contribuíram de forma direta para alcançar os objetivos do projeto, assegurando a capacitação de decisores e gestores do território através da disponibilização de dados fiáveis sobre os riscos de inundação. Esta informação permitiu o desenvolvimento de estratégias de planeamento adaptativo e a gestão eficiente de recursos em situações de eventos extremos. Adicionalmente, promoveu-se a transferência de conhecimento técnico e científico para as entidades responsáveis pela gestão do território, reforçando a colaboração entre a academia e os organismos públicos e fomentando o desenvolvimento sustentável da região.

Foi também dada especial atenção à consciencialização e preparação da comunidade local, garantindo o acesso a informações detalhadas e claras sobre os impactos das alterações climáticas e das ações antropogénicas no risco de inundação. Este esforço contribuiu para aumentar a capacidade de resposta das populações aos desafios associados aos eventos extremos. Simultaneamente, avaliou-se a eficiência de diversas medidas estruturais na mitigação do risco de inundação, o que fomentou o debate sobre soluções que possam reforçar a resiliência do território face às ameaças crescentes.

1.2.2 Atividade 2 – Medidas de adaptação

A cartografia de inundação produzida na Atividade 1 foi analisada em detalhe pela Equipa Técnica e pelas entidades envolvidas no estudo, resultando na definição de recomendações e soluções destinadas a reduzir os riscos associados a eventos extremos de inundação. A definição de estratégias de mitigação e adaptação às inundações incidiu essencialmente na formulação de medidas estruturais, beneficiando da capacidade do modelo hidrodinâmico desenvolvido ao longo do projeto para prever a extensão de inundação sob diferentes condições geomorfológicas da laguna.

Esta atividade contribuiu para a produção de conhecimento técnico e científico rigoroso através da análise da cartografia de inundação e do desenvolvimento do modelo hidrodinâmico previsto na candidatura, permitindo compreender a dinâmica e o risco de inundações em cenários futuros. As medidas estruturais propostas fornecem previsões com elevada fiabilidade, capacitando decisores e gestores para ajustarem o planeamento territorial e melhorarem a gestão de meios durante eventos extremos. Adicionalmente, a interação entre a Equipa Técnica e as entidades envolvidas na execução do projeto promoveu a transferência de conhecimento, fortalecendo a segurança e a resiliência da região. Por fim, a avaliação da eficácia de medidas estruturais e o debate de soluções práticas reforçam a resiliência territorial, contribuindo para a concretização dos objetivos do projeto.

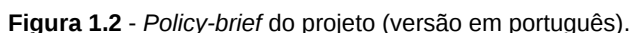
1.2.3 Atividade 3 – Elaboração de relatórios

Durante a implementação do projeto, foram elaborados três relatórios e um documento *policy-brief*. O relatório inicial (R1) incidiu na revisão de literatura, recolha de dados, diagnóstico da situação objeto de estudo e mapeamento das políticas públicas e das necessidades dos utilizadores finais e na apresentação da síntese dos contributos obtidos no workshop WS1 com parceiros e intervenientes regionais.

O relatório intercalar (R2) foi composto pelas previsões de inundação para o clima atual e pela apresentação da cartografia de risco (“Percurso”), incluindo detalhes técnicos relativos aos cenários e atividades de divulgação realizadas no âmbito deste Estudo. No mesmo relatório foi ainda descrita a configuração do modelo numérico desenvolvido e os detalhes da sua calibração e validação. Este relatório foi apresentado no segundo workshop (WS2) aberto a todos os decisores políticos, sociais e empresariais de forma a apresentar as zonas suscetíveis a inundação e a discutir os resultados obtidos para o clima atual.

O presente relatório, denominado relatório final (R3), entregue no final do projeto contém informação sintetizada e pertinente resultante do Estudo, incluindo as previsões

No final do Estudo foi ainda elaborado um documento *policy-brief* (Figura 1.2), em língua portuguesa e inglesa, que destaca as principais conclusões/recomendações decorrentes do estudo realizado. Foram efetuadas 300 impressões do documento, o qual foi apresentado e disseminado a toda a comunidade no workshop WS3.



Ao longo do Estudo foram organizadas diversas ações que fomentaram a criação de pontes entre cientistas, gestores, legisladores de políticas públicas e público em geral, nomeadamente:

13

2) Definição da identidade visual do projeto (Anexo II), concebida para refletir a seriedade, a precisão e relevância dos dados e análises produzidos, destacando a importância do Estudo para a comunidade local e para as diferentes entidades interessadas. Foram desenvolvidos um logótipo (Figura 1.3), um website (<http://inundaria.web.ua.pt/>), páginas nas redes sociais (Instagram, Facebook, LinkedIn) (Figura 1.4) e materiais de divulgação (policy-brief (Figura 1.2), flyers (Figura 1.5) e cartazes (Figura 1.6).



Figura 1.3 - Logótipo do projeto.

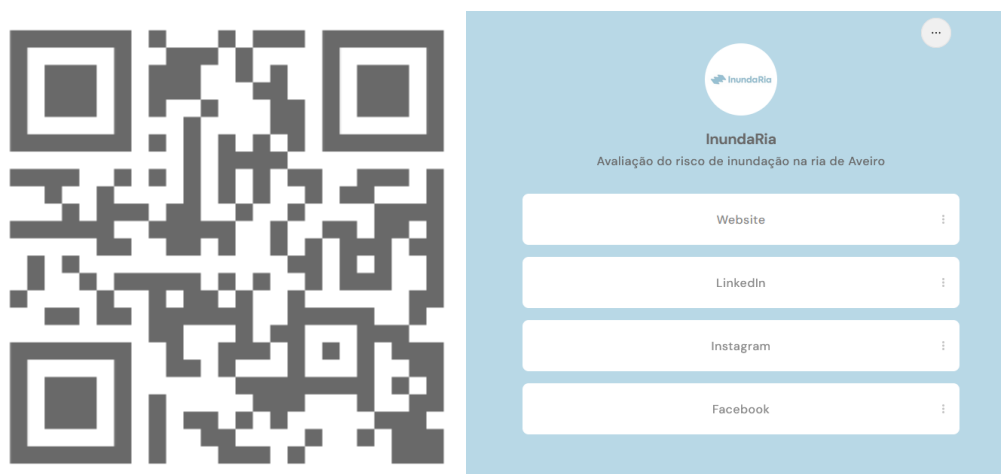


Figura 1.4 - QR code para o acesso ao website e às redes sociais.



Figura 1.5 - Flyer de divulgação do 1º workshop do projeto.



Figura 1.6 - Cartaz de divulgação do 2º workshop do projeto.

1.3 Grau de cumprimento da operação e justificação de eventuais desvios

O projeto foi executado em total conformidade com o plano inicial, apresentando um grau de 100% de cumprimento das atividades propostas. Não foram identificados desvios ao plano de execução, garantindo-se o rigor técnico e científico em todas as atividades. No entanto, a entrega dos relatórios 1 e 2, assim como a realização dos Workshops 1 e 2, registaram um ligeiro atraso de aproximadamente um mês face ao previsto em candidatura, decorrente de atrasos iniciais na formalização oficial do contrato entre a entidade financiadora e o beneficiário.

2 Estudo

Este estudo temático desenvolvido no âmbito do projeto InundaRia tem como objetivo oferecer uma análise rigorosa e detalhada da dinâmica de inundações na Ria de Aveiro, munindo os utilizadores e decisores políticos da região de previsões fidedignas fundamentais à preparação do território para eventos extremos, tornando-o mais resiliente às ameaças futuras. A região da Ria de Aveiro apresenta elevada suscetibilidade a inundações, sendo frequentemente atingida por eventos severos cujas consequências ambientais e socioeconómicas se têm vindo a agravar nas últimas décadas, não só devido ao aumento da frequência dos eventos, mas também da sua magnitude e, consequentemente, dos danos que causam. Para mais detalhes acerca da região objeto de estudo, incluindo histórico de eventos de cheias, o território, aspetos socioeconómicos, hidrodinâmica e evolução morfológica das últimas décadas, deve ser consultado o Anexo IV.

2.1 Metodologia

O risco de inundação foi avaliado aplicando a metodologia Fonte - Percurso – Recetor. Trata-se de uma abordagem multidisciplinar já aplicada com sucesso pela equipa técnica (Lopes, 2016; Lopes et al., 2017, 2022), que integra os seguintes módulos:

“Fonte” – é feita a caracterização dos agentes forçadores de inundação, incluindo a intensidade de eventos extremos para diferentes períodos de retorno e variações induzidas pelas alterações climáticas.

“Percurso” – os resultados obtidos no módulo “Fonte” são usados neste módulo que simula a propagação e extensão de inundação através da aplicação de um modelo hidrodinâmico de elevada resolução espacial, desenvolvido propositadamente para simular inundações na Ria de Aveiro.

“Recetor” – os resultados obtidos no módulo “Percurso” são transpostos para um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e confrontados com informação territorial, de forma a identificar os elementos socioeconómicos expostos ao perigo de inundação.

2.1.1 Caracterização dos agentes causadores de inundações

Os eventos de cheias na região da Ria de Aveiro são determinados por forçamentos de natureza oceânica e fluvial. Os fatores fluviais são responsáveis pela entrada de fluxos de água doce, enquanto os fatores oceânicos incluem as oscilações na superfície livre provocadas pela maré, tempestades, agitação marítima e nível médio

do mar. A caracterização dos agentes forçadores de cheias é efetuada frequentemente através da análise estatística de séries temporais longas de observações (por exemplo, registos maregráficos e caudais fluviais) e posterior determinação da sua magnitude para determinados períodos de retorno. No entanto, tendo em consideração a escassez de observações de algumas grandezas relevantes, e também a necessidade de definir cenários em situações futuras resultantes de alterações climáticas, recorreu-se também à aplicação de modelos numéricos de previsão para a geração de informações complementares.

O principal objetivo desta secção é então caraterizar os agentes causadores de inundações na Ria de Aveiro, incluindo a magnitude e a probabilidade de ocorrência nos climas atual e futuro. Os resultados desta investigação fornecerão estimativas de variáveis oceânicas e fluviais para introduzir como condições de fronteira no modelo numérico hidrodinâmico especialmente desenhado e desenvolvido para simular o percurso da inundação na Ria de Aveiro.

2.1.1.1 Maré astronómica, maré meteorológica e níveis do mar extremos

Os níveis de maré astronómica e meteorológica foram caracterizados através do processamento e análise dos dados maregráficos registados na Barra (embocadura da laguna) entre 1976 e 2023. A componente astronómica da maré (amplitude e fase dos constituintes de maré) foi determinada através da realização de análise harmónica às séries temporais de elevação da superfície livre, recorrendo à subrotina de Matlab *t_tide* (Pawlowicz et al., 2002). Este procedimento foi efetuado às séries de elevação anuais observadas, tendo-se determinado posteriormente as séries anuais de maré astronómica através de síntese harmónica, e os níveis de interesse da maré astronómica apresentados na Tabela 2.1. Os níveis anuais de maré astronómica foram seguidamente analisados estatisticamente a fim de determinar tendências anuais de evolução.

Tabela 2.1 - Descrição dos níveis de interesse para a maré astronómica (Fonte: Instituto Hidrográfico: <https://www.hidrografico.pt/m.mare>).

Descrição	
Preia-mar Máxima (PMMax)	Nível da maré astronómica mais alta. É a altura de água máxima que se prevê que possa ocorrer devida à maré astronómica, para o respetivo ano.
Preia-mar de Águas Vivas (PMAV)	É o valor médio, tomado ao longo do ano, das alturas de maré de duas preia-mares sucessivas, que ocorrem quinzenalmente quando a amplitude de maré é maior.

Preia-mar de Águas Mortas (PMAM)	É o valor médio, tomado ao longo do ano, das alturas de maré de duas preia-mares sucessivas, que ocorrem quinzenalmente quando a amplitude de maré é menor.
Baixa-mar de Águas Mortas (BMAM)	É o valor médio, tomado ao longo do ano, das alturas de maré de duas baixa-mares sucessivas, que ocorrem quinzenalmente quando a amplitude de maré é menor.
Baixa-mar de Águas Vivas (BMAV)	É o valor médio, tomado ao longo do ano, das alturas de maré de duas baixa-mares sucessivas, que ocorrem quinzenalmente quando a amplitude de maré é maior.
Baixa-mar Mínima (BMMin)	Nível da maré astronómica mais baixa. É a altura de água mínima que se prevê que possa ocorrer devida à maré astronómica, para o respetivo ano.

A análise efetuada aos níveis de maré meteorológica também se baseou nos dados registados no marégrafo da Barra entre 1976 e 2023. Em detalhe, para cada ano de registos determinou-se o residual de maré por subtração entre os valores de nível medidos e determinados para o mesmo instante por síntese harmónica. Seguidamente, identificou-se para cada ano todos os eventos de maré meteorológica como sendo os níveis residuais superiores a 3 vezes o desvio padrão da respetiva série residual, aplicando o algoritmo desenvolvido por Pinheiro et al. (2020). Os níveis máximos anuais de maré meteorológica foram de seguida ajustados a uma distribuição GEV (*Generalized Extreme Value*), determinando-se, a partir desta, níveis de maré meteorológica para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

A ocorrência simultânea de níveis de maré astronómica e meteorológica é extremamente importante na avaliação do risco de inundação, uma vez que a extensão da inundação e os consequentes danos causados por eventos de maré meteorológica depende do estado da maré astronómica em que ocorre o evento. De facto, o mesmo evento de maré meteorológica tem impactos diferentes na laguna se ocorrer em condições de maré morta ou viva. Atendendo ao exposto, determinaram-se níveis do mar extremos, tendo em consideração o efeito combinado da maré astronómica e meteorológica. Neste estudo, foi aplicado o método de probabilidade conjunta aos dados registados no marégrafo da Barra (1976 e 2023) a fim de determinar os níveis do mar extremos para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos. Este procedimento foi aplicado às séries de elevação anuais da maré astronómica e da maré meteorológica (níveis residuais) determinadas anteriormente, considerando que os eventos de maré astronómica e meteorológica são independentes, e determinando-se a probabilidade conjunta multiplicando as probabilidades de ocorrência de níveis residuais e de maré astronómica.

2.1.1.2 Nível médio do mar

A evolução do nível médio do mar foi caracterizada analisando os registos maregráficos da Barra no período compreendido entre 1976 e 2023. Os níveis médios anuais obtidos por análise harmónica foram utilizados para determinar a tendência de variação do nível médio do mar durante este período.

Foram definidos cenários de subida do nível médio do mar para a costa Portuguesa para o futuro próximo (2045) e futuro longínquo (2081-2100). As projeções de subida do nível médio do mar baseiam-se nos resultados do 6º relatório do IPCC (AR6) e estão disponíveis através da plataforma *NASA Sea Level Change Projection Tool* (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>). As projeções foram obtidas através de modelos climáticos que simularam a resposta do sistema climático a 2 cenários *Shared Socio-economic Pathway* (SSP) ilustrativos de diferentes emissões de gases com efeito de estufa atendendo a diferentes evoluções socioeconómicas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Detalhes dos cenários SSP do 6º relatório do IPCC.

	Descrição
SSP2-4.5	Emissão moderada de gases com efeito de estufa. Diminuição das emissões anuais de CO ₂ a partir de 2060.
SSP5-8.5	Emissão muito elevada de gases com efeito de estufa. Aumento das emissões anuais de CO ₂ até 2080 e estabilização após essa data.

2.1.1.3 Agitação marítima

A agitação marítima na costa oeste da Península Ibérica tem padrões sazonais, verificando-se uma agitação mais energética no regime de inverno (dezembro-fevereiro) em que os parâmetros de onda – altura significativa (H_s) e o período de pico (T_p), têm os valores mais elevados durante o ano. Os parâmetros de onda para o período de Inverno baseiam-se nos resultados dos estudos na região costeira de Aveiro (Ribeiro et al., 2021b, 2023) e foram obtidas através de modelos numéricos de agitação marítima (Ribeiro et al., 2020a, 2020b, 2021a, 2021b, 2023) que simularam a agitação marítima para a costa oeste da Península Ibérica para os períodos compreendidos entre 1980 e 2005, 2026 e 2045 e entre 2080 e 2100. Estes estudos identificaram o melhor modelo global (GCM) do 5º relatório do IPCC (AR5) para o cenário RCP8.5, que melhor descreve a agitação marítima na costa oeste da Península Ibérica através de uma análise estatística (*Overlap percentage*, *root mean error square* e *bias*). Posteriormente foi feito um *downscaling* dinâmico do GCM selecionado através do modelo *Simulating WAVes Nearshore* (SWAN) de forma a obter a agitação com elevada resolução na costa.

Este procedimento visou a obtenção de dados de altura significativa, período de pico e direção média/pico com elevada resolução para a costa portuguesa para as condições de agitação extremas. Nestes estudos foram ainda identificados os períodos de retorno para os parâmetros da onda (H_s , T_p), que foram ajustados a uma distribuição GEV, determinando-se, a partir desta, a probabilidade de ocorrência para períodos de retorno de 2, 10, 25 e 100 anos (Ribeiro et al., 2021b, 2023).

2.1.1.4 Caudal fluvial

Devido à escassez de observações dos caudais fluviais que desaguam na Ria de Aveiro, os dados analisados correspondem a previsões diárias do modelo de bacia SWAT efetuadas para os climas atual e futuro. Este modelo foi calibrado para os principais afluentes da Ria de Aveiro através da comparação de dados históricos de observações e previsões numéricas. Posteriormente, o modelo foi alimentado por dados de precipitação observada para o clima atual (1932 a 2010) e por precipitação prevista pelo modelo de circulação global ECHAM5 para o clima futuro (2071 a 2100), considerando o cenário SRES A2, tendo sido previstas séries diárias de caudal fluvial para cada um dos cinco afluentes e para os períodos indicados. Os caudais médios diários previstos pelo modelo SWAT foram disponibilizados através do projeto ADAPTARia (<http://www.nmec.eu/images/caplivros/DocumentoC.pdf>). As previsões diárias para cada afluente foram analisadas e determinaram-se os seus máximos anuais, que se ajustaram a distribuições estatísticas (Generalized Extreme Value (GEV), Gamma, Log-n, Exponencial, Gumbel e Weibull). Recorrendo à distribuição estatística que melhor representa cada série de máximos anuais determinaram-se os valores de caudal para os períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos, para cada um dos cinco afluentes considerados neste estudo, tanto para o clima atual como para o clima futuro.

2.1.2 Avaliação do risco de inundação

2.1.2.1 Implementação do modelo hidrodinâmico

No presente trabalho foi utilizado o modelo hidrodinâmico Delft3D, em modo bidimensional. A implementação numérica desenvolvida para este estudo teve por base uma versão desenvolvida previamente por Lopes et al. (2022), recorrendo a uma malha estruturada curvilínea com 477×1254 células e 135644 elementos de cálculo. A resolução espacial varia entre 20-50 m no interior da laguna e 60-250 m na região da plataforma continental adjacente à embocadura da Ria de Aveiro. A partir da grelha numérica construiu-se um modelo digital de terreno (MDT) (Figura 1) que inclui informação topográfica e batimétrica atualizada da região. Mais concretamente, o MDT

desenvolvido por Lopes et al. (2022) foi atualizado de forma a incorporar dados batimétricos obtidos após as atividades de dragagens ocorridas na execução da obra *“Empreitada de Transposição de Sedimentos para Otimização do Equilíbrio Hidrodinâmico na Ria de Aveiro”*. Desta forma, o MDT inclui informação de diversos levantamentos batimétricos e topográficos, designadamente:

2022 – levantamentos batimétricos em regiões dos canais de Mira, Ílhavo e São Jacinto, cedidos pela empresa Monitar, Lda.

2020 – levantamento batimétrico no canal da entrada da laguna, feito pela Universidade de Aveiro (Cavalinhos et al., 2020)

2011 – levantamentos batimétricos nos quatro canais principais, cedidos pela Sociedade Polis Ria de Aveiro, SA

2011 – Topografia Lidar das margens e canais planícies de maré, cedidos pela Direção-Geral do Território

1987 – levantamento topo-batimétrico de toda a laguna, cedidos pelo Instituto Hidrográfico

Importa realçar que foram usados os dados mais recentes sempre que existia sobreposição de levantamentos. Desta forma, o MDT resultante (Figura 2.1) descreve a topografia dos canais da Ria de Aveiro, das planícies de maré e do território adjacente à laguna até à cota de 10 m.

Apesar da elevada resolução espacial da grelha numérica (20 m em algumas regiões) verificou-se que esta era insuficiente para descrever explicitamente algumas estruturas de proteção contra as inundações. Por exemplo, as estradas que contornam grande parte dos canais da laguna, o dique do Baixo Vouga Lagunar e diversas motas de proteção contra as inundações têm uma largura inferior a 20 m, sendo por isso impossível descrevê-las explicitamente na grelha numérica. Dada a importância destas estruturas no controlo da inundação, estas foram definidas como processos de subescala através do processo *2D weir*. Os *2D weirs* são estruturas fixas com uma altura de crista definida pelo utilizador, consideradas no modelo numérico para determinar se um ponto da grelha deve ou não ser considerado nos cálculos numéricos. A implementação numérica considera as estruturas *2D weir*, representadas na Figura 2.1, para representar estradas e diques existentes, cuja altura de crista foi atribuída de acordo com os dados topográficos disponibilizados pelos parceiros deste projeto, designadamente:

- de toda a região da Ria de Aveiro, cedidos pela Comunidade Intermunicipal da Região de Aveiro (CIRA)
- da envolvente à estrada do Sal, cedidos pelo Município de Aveiro

- da Região do Baixo Vouga lagunar, disponibilizados pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, I.P (CCDR Centro)

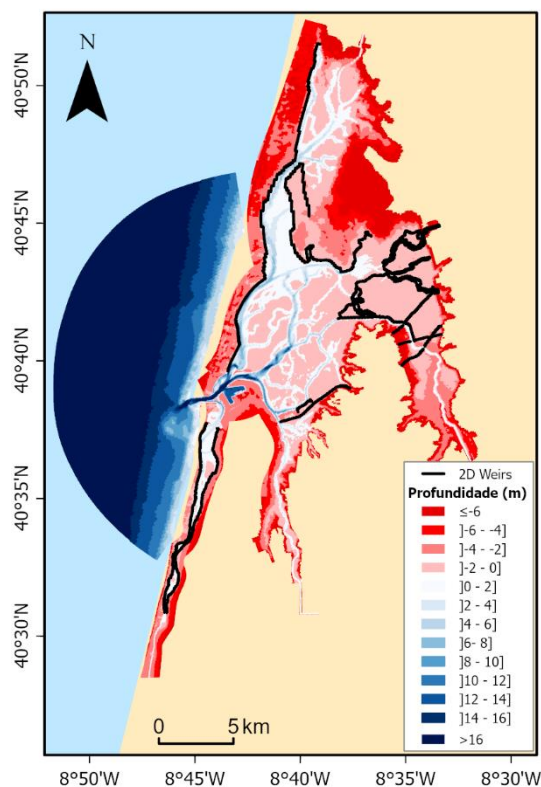


Figura 2.1 - Modelo digital de terreno (MDT) interpolado para a grelha numérica do Delft3D e localização dos 2D weirs.

A implementação hidrodinâmica foi acoplada ao módulo de agitação marítima (WAVE) de forma a resolver a interação simultânea entre os dois módulos, indispensável para a determinação com rigor das correntes induzidas pelas ondas na hidrodinâmica na Ria de Aveiro, e consequentemente permitir uma determinação mais rigorosa da elevação da superfície livre. Com este objetivo foi desenvolvida uma grelha numérica curvilínea irregular para a região costeira contígua à Ria de Aveiro com uma resolução espacial variável de 50 m na entrada da Ria de Aveiro e 500 m ao largo (Ribeiro et al., 2021b). Nesta grelha numérica construiu-se um MDT através da interpolação dos levantamentos batimétricos descritos anteriormente e dos dados obtidos na base de dados General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/). Este MDT foi atualizado incorporando os resultados recentes de levantamentos batimétricas da região, como previamente realizado na implementação hidrodinâmica.

Relativamente ao modelo de agitação marítima, o espectro de ondas necessário ao seu forçamento foi discretizado em 24 componentes no domínio da frequência (0.05-1 Hz) e 36 componentes direcionais. Foram também definidos diversos parâmetros

físicos necessário à otimização do modelo, tais como atrito de fundo, difrações e refrações, e *whitecapping*, resolvido pelo termo exponencial de Komen.

De forma a avaliar a capacidade do modelo em reproduzir com precisão o nível da água na região de estudo foi efetuada a respetiva validação, comparando a elevação da superfície livre observada *in situ* e prevista em 10 estações (Anexo III).

2.1.2.2 Simulações numéricas

Uma vez assegurado que o modelo prevê com rigor as condições hidrodinâmicas da Ria de Aveiro, este foi usado para simular as características da inundação para diferentes cenários, incluindo cenários climáticos atuais e futuros, que descrevem variações dos agentes forçadores de inundações (condições fronteira do modelo), e cenários de medidas estruturais, que descrevem alterações na configuração geométrica e morfológica da laguna (MDT e *2D weirs*). A definição de cenários a simular com o modelo hidrodinâmico teve como suporte os resultados relativos à caracterização dos agentes causadores de inundação (Módulo Fonte), e a sua conjugação com o mapeamento das necessidades dos *stakeholders* referidas no primeiro *WorkShop* do projeto (Anexo I).

2.1.2.2.1 Cenários climáticos

Os resultados da caracterização dos agentes causadores de inundação foram apresentados aos parceiros e utilizadores finais no primeiro *Workshop* do InundaRIA (Anexo I), tendo-se definido 12 cenários atuais e futuros (Tabela 2.3) atendendo às necessidades identificadas. Estes cenários climáticos incluem a definição da magnitude dos agentes causadores de inundação para diferentes períodos de retorno e condições de clima atual e clima futuro. Considerou-se como situação de referência (Ref.) um cenário que inclui apenas o forçamento do modelo pela variação da maré astronómica para o nível de Preia-Mar de Águas Vivas (PMAV) do ano 2023 para o nível médio do mar atual. De salientar que todos os cenários definidos incluem essa condição de maré de forma a facilitar a interpretação da extensão de inundação. Os cenários AC1 a AC5 definem eventos extremos em condições de clima atual, sendo que AC1 e AC2 pretendem simular inundações de origem marinha (períodos de retorno de 2 e 100 anos, respetivamente), AC3 e AC4 inundações de origem fluvial (períodos de retorno de 2 e 100 anos, respetivamente), e AC5 o efeito combinado de eventos extremos de origem marinha e fluvial mais gravosos (período de retorno de 100 anos). Já os cenários Fref. e FC1 a FC5 pretendem recriar os mesmos eventos em cenários futuros de alterações climáticas, e por isso, consideram projeções de nível médio do mar, agitação marítima e caudal fluvial de climas futuros. Destaca-se que a análise a efetuar sob condições de

clima futuro terá como base o ano de 2045 que representa um futuro próximo, e como tal de maior interesse e utilidade para os *stakeholders* e *end users*.

Tabela 2.3 - Cenários combinando forçamentos de origem oceânica e fluvial.

	Oceânico								Fluvial				
Cenário	Maré Astronómica	Maré Meteorológica		Agitação				Nível Médio		Caudal			
	PMAV	Atual		Atual		Futuro		Atual	Futuro	Atual		Futuro	
		2	100	2	100	2	100			2	100	2	100
Ref.	x							x					
AC1	x	x		x				x					
AC2	x		x		x			x					
AC3	x							x		x			
AC4	x							x			x		
AC5	x		x		x			x			x		
FRef.	x								x				
FC1	x	x				x			x				
FC2	x		x				x		x				
FC3	x								x			x	
FC4	x								x				x
FC5	x		x				x		x				x

Para todos os cenários, o modelo simulou um período de dez dias, tendo sido determinada a extensão máxima de inundação e a profundidade de inundação a partir da análise dos resultados do modelo para a elevação da superfície livre do mar. A extensão da inundação foi transposta para uma estrutura do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e usada para produzir a cartografia de inundação, designadamente mapas de extensão e de profundidade de inundação. Adicionalmente, a extensão de inundação foi cruzada com dados socioeconómicos georreferenciados da região de estudo, designadamente:

- Censos de 2021 de Base Geográfica de Referência de Informação (BGRI 2021) fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE)
- Carta de Uso e Ocupação do Solo de 2018 (COS 2018) produzido e fornecido pela Direção Geral do Território (DGT).

O número de residentes diretamente afetados por inundações e as áreas expostas a inundações para diferentes tipos de uso e ocupação do solo foram determinados e analisados para cada cenário.

Importar notar que os resultados da cartografia de inundação para o clima atual foram apresentados no segundo *Workshop* do InundaRia (Anexo I) aos parceiros e

utilizadores finais, os quais validaram os mapas apresentados. Já a cartografia de inundação para os cenários de clima futuro foi apresentada no *Workshop* final do projeto InundaRia (Anexo I).

2.1.2.2.2 Medidas estruturais

Da interação com os *stakeholders* no primeiro *Workshop* (Anexo I) concluiu-se pela necessidade de definir cenários que incluem a implementação de medidas estruturais. Assim, para além das simulações descritas anteriormente que usarão a configuração de referência do modelo, definiram-se cenários de medidas estruturais que implicam alterações à configuração do modelo numérico (Tabela 2.4). A Conf.1 (Figura 2.2a) envolve a implementação de barreiras de contenção de forma a completar o dique do Baixo Vouga Lagunar e permitirá avaliar se esta é uma medida eficiente no controlo da intrusão salina. Com a Conf.2 (Figura 2.2b) pretende-se avaliar o efeito do dique do Rio Novo do Príncipe e da barreira de proteção da margem esquerda, obra essa que já está a ser implementada no terreno. Os cenários Conf.3, 4 (Figura 2.2c e 2.3d) pretendem avaliar o efeito da implementação de medidas estruturais na região do Porto de Aveiro, incluindo um muro de contenção adjacente ao Cais dos Bacalhoeiros (Conf.3) e um novo terminal portuário em São Jacinto (Conf.4). Atendendo às evidências de erosão do cordão dunar a Sul da Barra e à ocorrência no passado da rutura do mesmo durante tempestades, pretende-se ainda recriar o efeito da abertura de uma segunda embocadura junto à Praia do Labrego (Figura 2.2e).

Tabela 2.4 - Cenários de medidas estruturais.

Cenário	Definição
Conf.1	Sistema de defesa contra as marés
Conf.2	Reforço da margem esquerda do Rio Novo do Príncipe
Conf.3	Muro de contenção adjacente ao Cais dos Bacalhoeiros
Conf.4	Extensão do Porto de Aveiro para São Jacinto
Conf.5	Abertura de uma segunda embocadura junto à Praia do Labrego

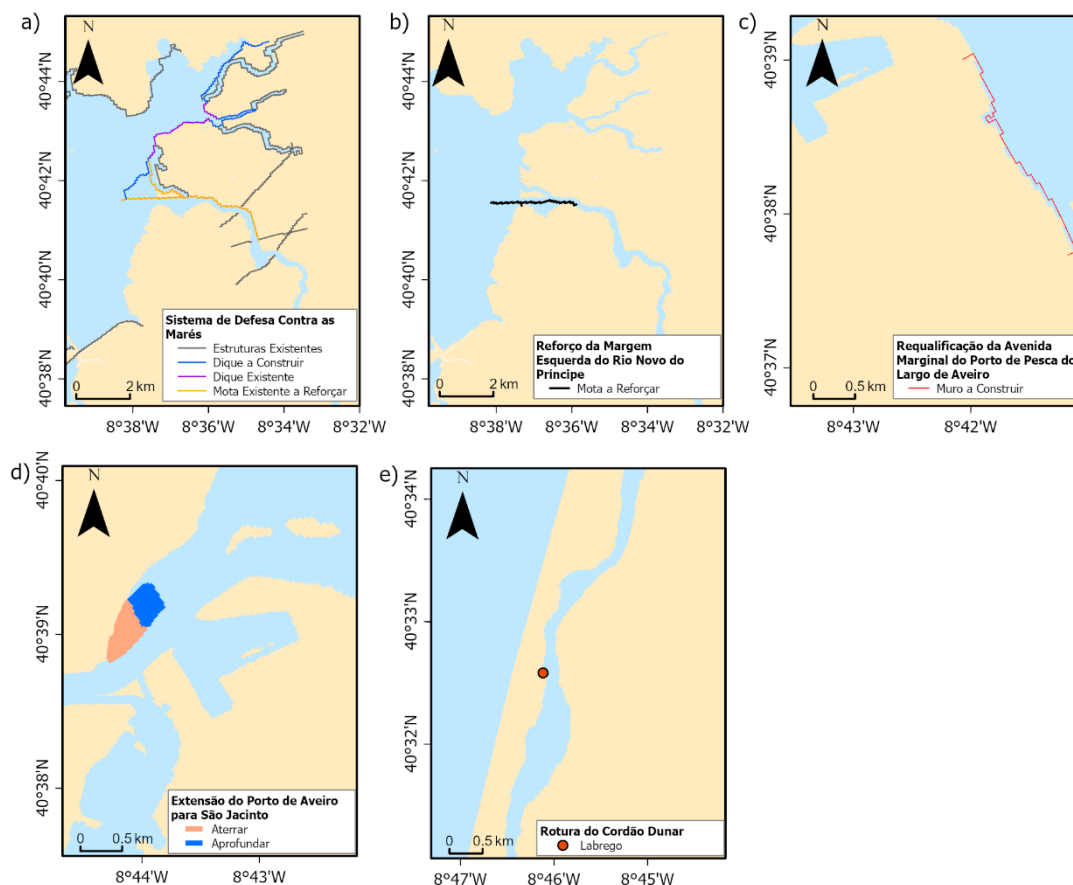


Figura 2.2 - Cenários de medidas estruturais: a) Conf.1, b) Conf.2, c) Conf.3, d) Conf.4 e) Conf.5.

Para cada configuração foram realizadas várias simulações para um período de dez dias, tendo sido determinada a extensão máxima de inundação. Os mapas de extensão de inundação com e sem a implementação da obra foram sobrepostos, e identificadas as regiões:

- 1) Inunda com e sem obra – representam as regiões que são suscetíveis a inundações tanto em condições atuais como com a implementação da obra.
- 2) Inunda sem obra – representam regiões que em condições atuais são suscetíveis a inundações e que ficam protegidas pela implementação da obra.
- 3) Inunda com obra – representam regiões protegidas em condições atuais e que se tornam suscetíveis a inundações pela implementação da obra.

Importar notar que os resultados da cartografia de inundação considerando as medidas estruturais foram apresentados *Workshop* final do projeto InundaRia (Anexo I).

2.2 Resultados

2.2.1 Agentes causadores de inundações

2.2.1.1 Maré astronômica, maré meteorológica e níveis de mar extremos

Nas Figura 2.3a,b,c apresenta-se a evolução temporal dos níveis de preia-mar máxima, preia-mar de águas vivas e preia-mar de águas mortas, respetivamente. Os níveis de preia-mar máxima variaram entre 3.34 m em 1982 e 3.90 m em 2020, enquanto que os níveis de preia-mar de águas vivas variaram entre 3.23 m em 1982 e 3.59 m em 2023. O nível de preia-mar de águas mortas mínimo foi de 2.67 m em 1976 e 2.94 m em 2014. Os resultados evidenciam uma clara tendência de aumento dos níveis de preia-mar no período em estudo, tendo sido estimadas taxas de aumento de 7.8, 6.7 e 2.6 mm/ano nos níveis de preia-mar máxima, preia-mar de águas vivas e preia-mar de águas mortas, respetivamente. Nas Figura 2.3d,e,f apresenta-se a evolução temporal dos níveis de baixa-mar de águas mortas, baixa-mar de águas vivas e baixa-mar mínima, respetivamente. Os níveis de baixa-mar de águas vivas e águas mortas (Figura 2.3d,e), apresentam uma tendência de aumento de 1.0 e 2.6 mm/ano, respetivamente. No entanto, importa realçar que os coeficientes de correlação são inferiores aos obtidos em condições de preia-mar. Contrariamente, a taxa de variação anual dos níveis de baixa-mar mínimos é próxima de zero. Estes resultados evidenciam o aumento da amplitude de maré ao longo do tempo tanto em condições de maré viva como de maré morta e que é confirmada na Figura 2.4. A taxa de variação anual da amplitude de maré foi de 5.7 e 2.5 mm/ano em situação de maré viva e maré morta, respetivamente.

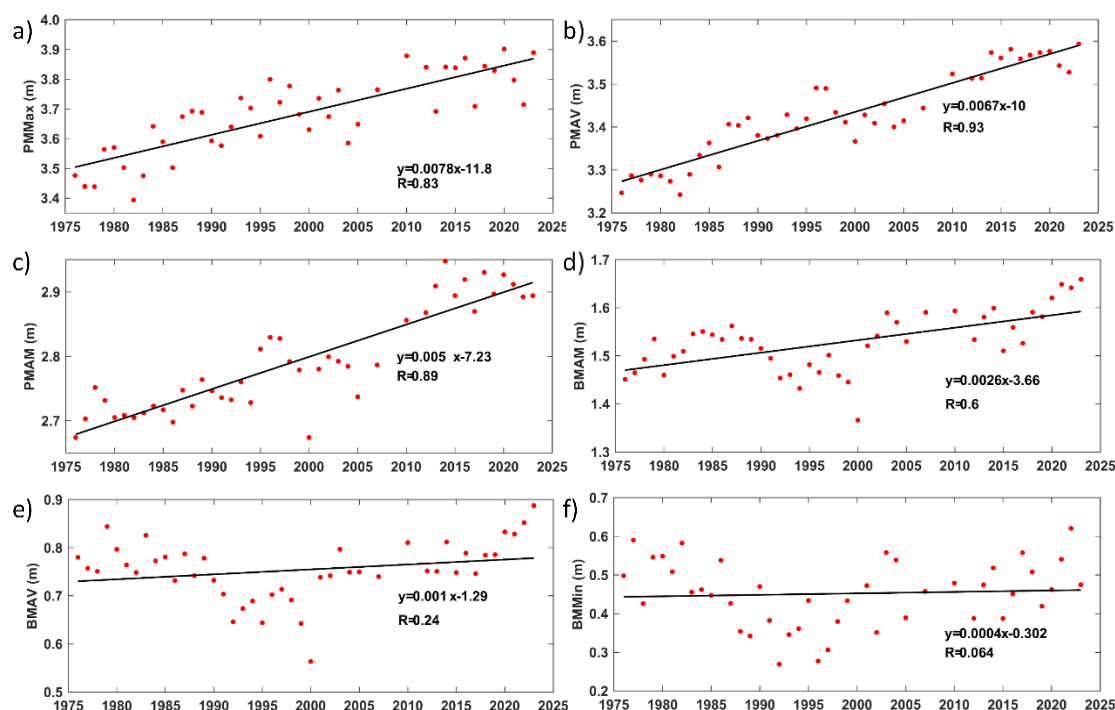


Figura 2.3 - Variação anual do nível (m): a) de preia-mar máxima (PMMax), b) de preia-mar de águas vivas (PMAV), c) Variação anual do nível (m) de preia-mar de águas mortas (PMAM), d) de baixa-mar de águas mortas (BMAM), e) de baixa-mar de águas vivas (BMAV), e) Variação anual do nível (m) de baixa-mar mínima (BMMin).

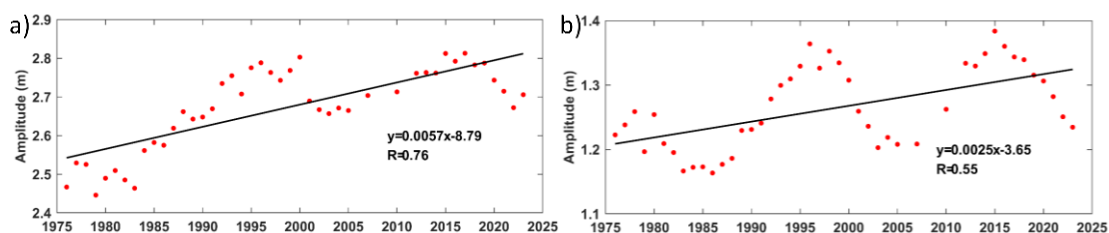


Figura 2.4 - Variação anual da amplitude de maré (m) em: a) situação de maré viva, b) em situação de maré morta.

Na Figura 2.5 representa-se a altura máxima anual da maré meteorológica (a), e a respetiva distribuição empírica e função de distribuição cumulativa teórica GEV (b). O maior evento de maré meteorológica observado teve uma altura máxima de 1.09 m e aconteceu a 30 de dezembro de 1981. Verifica-se que a maioria dos eventos tem uma altura máxima entre 0.46 e 0.62 m, e que a sua altura média é de 0.56 m. Na Tabela 2.5 apresenta-se a altura da maré meteorológica para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos. Os dados mostram que a altura dos eventos é tanto maior quanto maior o período de retorno. A cada dois anos ($T = 2$ anos) espera-se que ocorram eventos com mais de 0.51 m de altura. Adicionalmente, para um período de retorno de 10 anos é provável que aconteça uma sobrelevação de 0.76 m e que a cada 50 anos ocorra um evento que exceda 1.0 m de altura. Os resultados indicam que é possível que aconteça uma maré meteorológica com mais de 1.10 m de altura pelo menos uma vez em 100 anos.

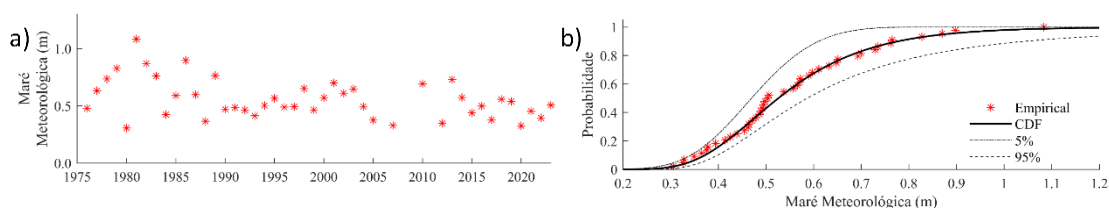


Figura 2.5 - a) altura máxima anual da maré meteorológica (m) e b) distribuição empírica e função de distribuição cumulativa teórica GEV.

Tabela 2.5 - Nível de maré meteorológica (m) para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Período de Retorno (anos)	2	10	25	50	100
Nível (m)	0.51	0.76	0.90	1.00	1.10

Na determinação dos níveis do mar extremos seguiram-se as recomendações de Pugh (2004) e assumiu-se que níveis do mar extremos ocorrem quando os níveis de maré meteorológica e maré astronómica são elevados. Em geral, assume-se como

níveis de maré astronómica elevados aqueles que excedem o nível de preia-mar de águas vivas (PMAV). Como o nível de PMAV tem aumentado ao longo dos anos calcularam-se os níveis do mar extremos considerando a variação das constantes harmónicas entre 2014 e 2023 (Tabela 2.6). Os resultados indicam que a variação das constantes harmónicas induz variações máximas dos níveis extremos de 0.17 m. Em detalhe, os níveis extremos mais baixos foram obtidos considerando as constantes harmónicas de 2017, com estimativas compreendidas entre 4.11 e 4.62 m para períodos de retorno de 2 e 100 anos. Já os níveis extremos mais elevados correspondem a 4.27 e 4.79 m para períodos de retorno de 2 e 100 anos considerando as constantes harmónicas de 2023, níveis estes que serão considerados nas simulações numéricas.

Tabela 2.6 - Níveis do mar extremos (m) para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Período de Retorno (anos)	2	10	25	50	100
2014	4.14	4.40	4.52	4.61	4.69
2015	4.12	4.37	4.49	4.57	4.66
2016	4.14	4.39	4.50	4.59	4.68
2017*	4.11	4.33	4.45	4.53	4.62
2018	4.17	4.42	4.53	4.62	4.71
2019	4.17	4.41	4.53	4.62	4.70
2020	4.21	4.45	4.57	4.66	4.74
2021	4.19	4.43	4.55	4.64	4.72
2022	4.20	4.45	4.57	4.65	4.74
2023**	4.27	4.50	4.62	4.71	4.79

* Ano que produz níveis extremos mais baixos

** Ano que produz níveis extremos mais elevados

2.2.1.2 Nível médio do mar

A variação anual do nível médio do mar na entrada da laguna é representada na Figura 2.6a. O nível médio do mar variou entre 2.02 m (ZH) em 2000 e 2.27 m (ZH) em 2023. Estes resultados destacam que o nível médio do mar aumentou a uma taxa de 3.4 mm/ano, ou seja, ligeiramente superior à taxa de 2.2 mm/ano obtido por Lopes (2016) ao analisar o registo do marégrafo de entrada entre 1976 e 2013.

Para definir o aumento futuro do nível médio do mar na região de estudo decorrente do impacto das alterações climáticas foram analisadas as projeções apresentadas no 6º relatório do IPCC (Figura 2.6b). Na Tabela 2.7 apresentam-se as

projeções de subida do nível médio do mar na costa Oeste Portuguesa. Os resultados revelam que o nível médio do mar deverá ser superior ao atual, independentemente do cenário SSP considerado. Para o futuro próximo (2045), esse aumento deverá estar compreendido entre 0.20 e 0.22 m dependendo do cenário considerado. Para datas mais longínquas aumenta a incerteza decorrente do cenário considerado, podendo o aumento do nível do mar variar entre 0.52 e 0.67 m para o período 2081-2100. Neste estudo considerou-se a estimativa de 0.22 m obtida para o cenário SSP5-8.5 para 2045.

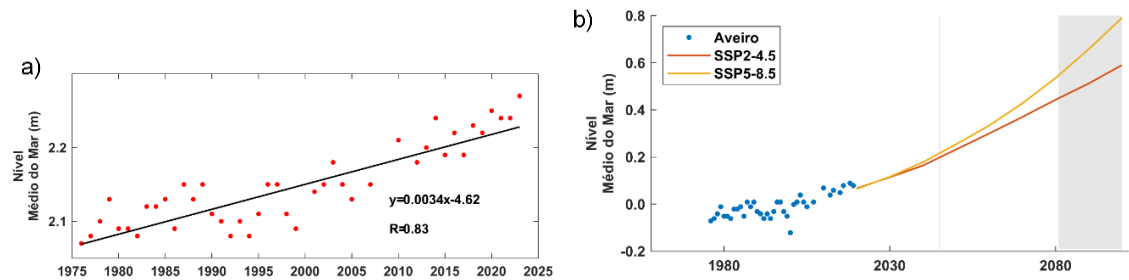


Figura 2.6 - a) Variação anual do nível médio do mar (m). b) Evolução da subida do nível médio do mar (m) na costa Oeste de Portugal até 2100.

Tabela 2.7 - Previsões de subida do nível médio do mar (m) para a costa Oeste de Portugal.

	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2045	0.20	0.22
2081-2100	0.52	0.67

2.2.1.3 Agitação marítima

A direção média da agitação marítima ao largo de Aveiro apresenta-se na Figura 2.7, verificando-se que as ondas são predominantes de noroeste e norte-noroeste para o clima histórico durante os meses de inverno (dezembro, janeiro e fevereiro). Para os períodos futuros as ondas terão uma predominância de norte-noroeste, o que mostra que haverá uma alteração do regime de agitação predominante durante os meses de inverno.

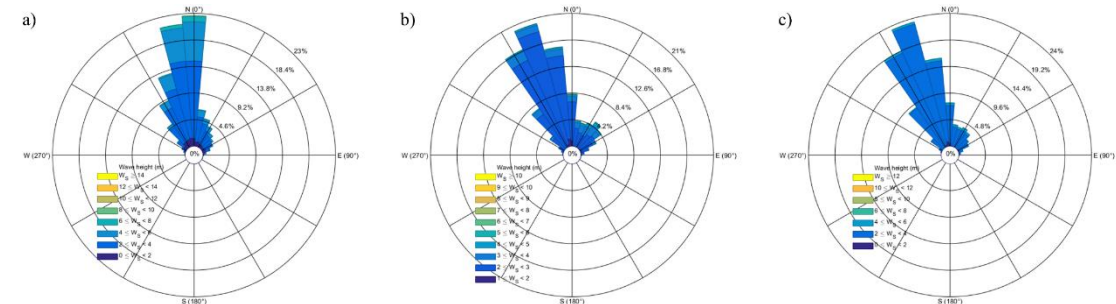


Figura 2.7 - Direção média para o período (a) histórico (1979-2005), (b) futuro próximo (2026-2045) e (c) longínquo (2081-2100).

Na Tabela 2.8 apresenta-se os parâmetros de onda que contribuem para agitação extrema, que em combinação com outros forçamentos (ex.: níveis extremos, caudais elevados) podem potenciar o nível de cheia em zonas próximas da embocadura da Ria de Aveiro. A altura significativa e o período de pico estão indicados para períodos de retorno de 10, 25 e 100 anos. Os dados mostram que a altura significativa e o período de pico vão aumentar gradualmente até ao final de século, e consequentemente ter valores superiores para períodos de retorno mais elevados, apresentando altura significativa de 11.6 m e período de pico de 23.3 segundos para o final de século e período de retorno de 100 anos.

Tabela 2.8 - Altura significativa, período de pico e direção média para os diferentes períodos. Altura significativa e período de pico para períodos de retorno de 10, 25 e 100 anos.

Período de retorno (anos)	Altura Significativa (m)				Período de Pico (s)				Direção média (°)	
	2	10	25	100	2	10	25	100	-	-
Histórico (1979-2005)	8.7	9.4	10.5	12.1	19.8	20.3	21.3	22.7	355	
Futuro próximo (2026-2045)	8.1	8.6	9.5	10.6	20.2	20.7	21.9	23.6	345	
Futuro longínquo (2081-2100)	8.6	9.4	10.3	11.6	20.5	20.7	21.8	23.3	345	

2.2.1.4 Caudal fluvial

Na Tabela 2.9 apresentam-se os caudais de ponta de cheia para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos nos 5 afluentes da Ria de Aveiro em condições de clima atual e clima futuro. Os resultados revelam que o caudal dos eventos é tanto maior quanto maior o período de retorno. Verifica-se ainda que o Rio Vouga é a principal fonte de água doce da Ria de Aveiro, revelando maiores valores de caudal para os maiores períodos de retorno. Verifica-se ainda uma diminuição dos caudais para o clima futuro em relação ao presente para todos os afluentes.

Tabela 2.9 - Caudal (m³/s) para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos para os afluentes da Ria de Aveiro em condições de clima atual e futuro

		2	10	25	50	100
Vouga	Presente	797	1302	1559	1750	1943
	Futuro	494	955	1175	1333	1485
Antuã	Presente	106	173	203	225	245
	Futuro	39	73	88	100	110
Cáster	Presente	47	78	94	106	118
	Futuro	17	32	39	44	49
Boco	Presente	33	63	81	94	108

	Futuro	8	19	25	31	37
Ribeira dos Moinhos	Presente	113	221	283	331	381
	Futuro	33	73	98	119	141

2.2.2 Cartografia de inundação

2.2.2.1 Cenários Climáticos

As Figura 2.8 e Figura 2.9 apresentam os resultados da extensão de inundação para eventos de origem marinha, fluvial e combinada, para o clima atual e futuro, respetivamente. No caso de eventos de origem marinha, constata-se que a maior área inundada ocorre na região do Baixo Vouga Lagunar, mais especificamente nos territórios dos municípios de Estarreja e Albergaria-a-Velha. Embora em menor extensão, também é possível notar a exposição de regiões no extremo Norte da laguna (município de Ovar), na entrada da laguna (municípios de Aveiro e Ílhavo) e à entrada da cidade de Aveiro. Já os eventos de origem fluvial afetam os territórios adjacentes à foz dos rios, sendo de destacar a elevada extensão de inundação na envolvência dos rios Vouga (municípios de Aveiro e Albergaria-a-Velha) e Antuã (município de Estarreja). Embora em menor extensão, é possível notar o efeito das elevadas descargas do Rio Cáster e da Ribeira dos Moinhos nos territórios dos municípios de Ovar e Mira, respetivamente. Os resultados evidenciam ainda que as elevadas descargas no Rio Boco não inundam os territórios envolventes. Os eventos que combinam elevados níveis do mar com elevadas descargas fluviais tendem a afetar de forma mais gravosa os territórios descritos anteriormente. Ademais, o efeito combinado coloca em perigo outros territórios, designadamente nos municípios da Murtosa e Vagos. Constata-se ainda um aumento da área inundada para eventos de origem marinha para o clima futuro relativamente ao atual.

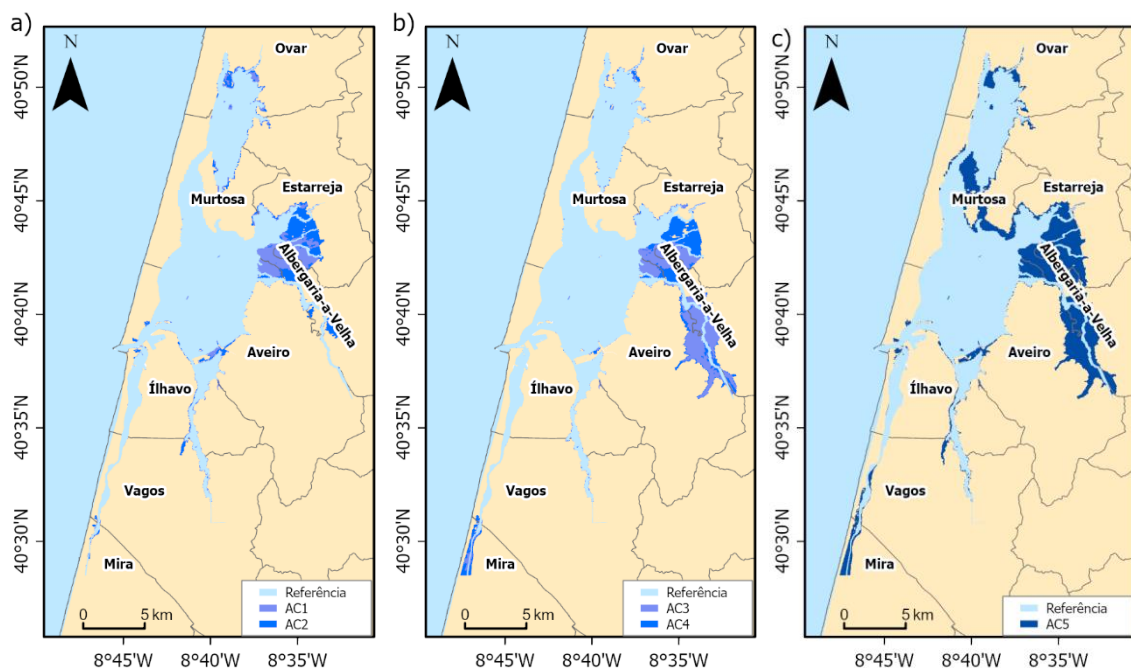


Figura 2.8 - Mapas de extensão de inundação para eventos de origem marinha (a), fluvial (b) e combinada (c) para o clima presente.

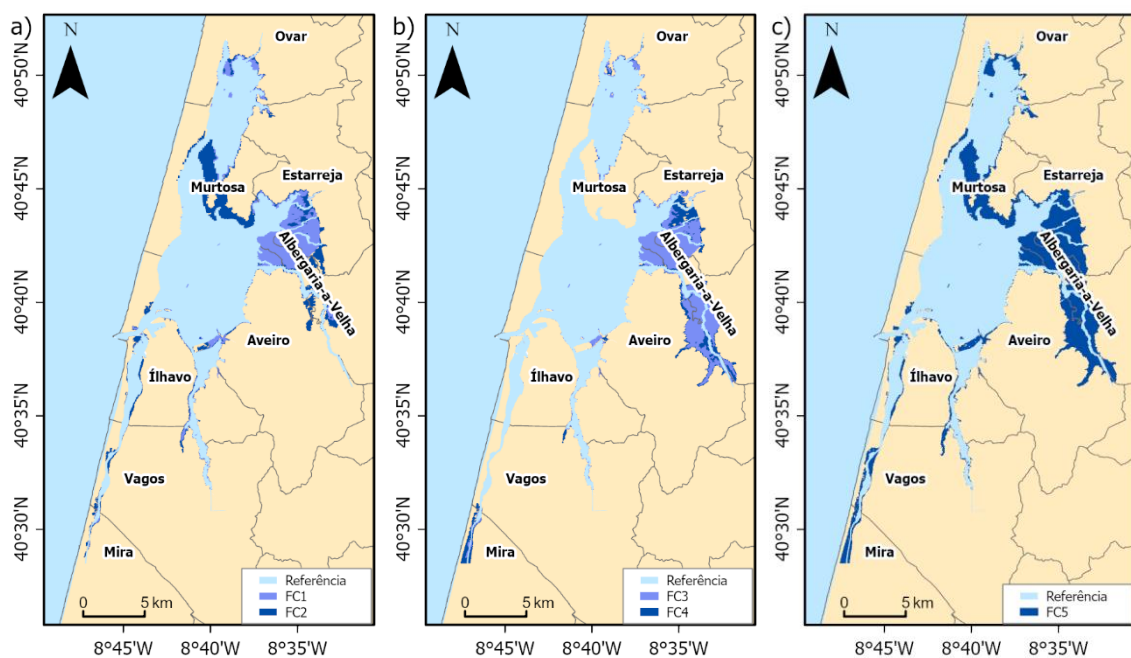


Figura 2.9 - Mapas de extensão de inundação para eventos de origem marinha (a), fluvial (b) e combinada (c) para o clima futuro.

Nas Figura 2.10 Figura 2.11 apresentam-se os mapas de profundidade de inundação para cada um dos cenários. Observa-se que as maiores profundidades de inundação são provocadas por eventos de origem fluvial, o que representa maior perigo para a população. Convém destacar que embora representem menor perigo para a população, os eventos de origem oceânica tendem a produzir elevados prejuízos económicos dado o efeito prejudicial da água salgada nos territórios.

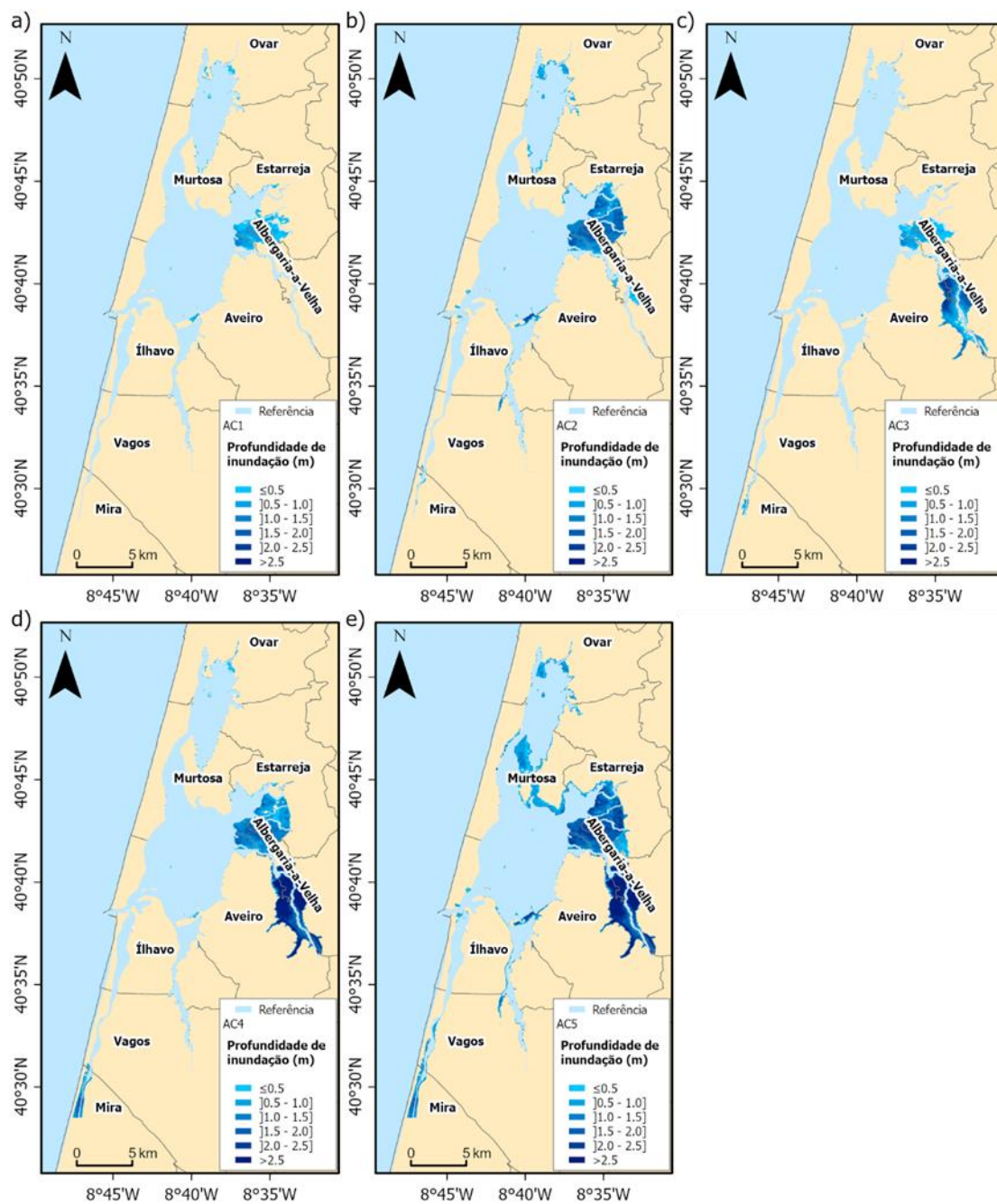


Figura 2.10 - Mapas de profundidade de inundação para os cenários AC1(a), AC2 (b), AC3 (c), AC4 (d) e AC5 (e).

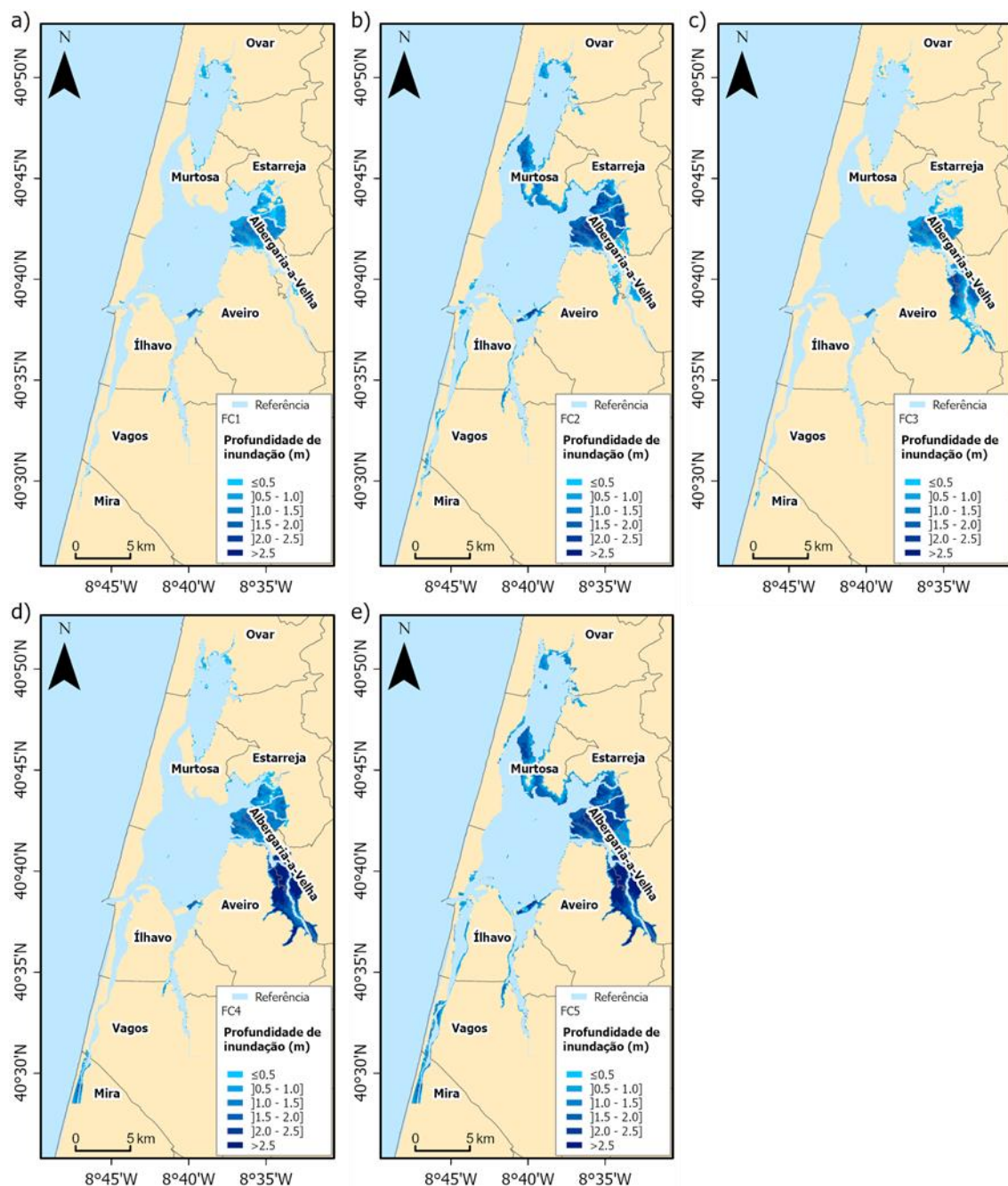


Figura 2.11 - Mapas de profundidade de inundação para os cenários FC1(a), FC2 (b), FC3 (c), FC4 (d) e FC5 (e).

Estima-se que a área dos territórios inundados (Tabela 2.10) por eventos de origem marinha para o clima atual varia entre 13.3 e 27.6 km², para eventos de 2 e 100 anos de período de retorno, respetivamente. Já para eventos de origem fluvial a área está compreendida entre 22.7 e 37.2 km², para eventos de 2 e 100 anos de período de retorno, respetivamente. Como esperado, o evento combinado de 100 anos de período de retorno é o que apresenta maior área inundada, 57.6 km². Prevê-se que a área inundada aumente para todos os cenários devido ao efeito da subida do nível médio do mar. As maiores taxas de aumento verificam-se nos eventos de origem marinha (~70%),

verificando taxas de aumento de 7 e 30% para os eventos de origem fluvial com 2 e 100 anos de período de retorno, respectivamente. A Figura 2.12a mostra que a grande maioria das áreas inundadas tem uso agrícola, representando cerca de 60 e 70% da área total para eventos de origem oceânica (AC1 e AC2) e fluvial (AC3 e AC4), respectivamente. Já os terrenos de pastagens representam cerca de 20% e 12% da área total para eventos de origem marinha e fluvial, respectivamente. Os territórios artificializados representam uma pequena parte da área total inundada, 1.5 e 5%, para eventos de origem marinha com 2 e 100 anos de período de retorno, respectivamente. Estas percentagens diminuem para 0.8 e 1.8% no caso de eventos de origem fluvial. Este comportamento evidencia que os territórios artificializados estão mais expostos a eventos de origem marinha do que fluvial, e que a área afetada aumenta com o período de retorno. Para o cenário AC5, a área inundada de territórios artificializados é de 2.9 km², o que representa 4.8% da área total inundada. Para o clima futuro (Figura 2.12b) a área inundada aumenta para todas as classes de uso do solo, sendo os maiores aumentos percentuais verificados na classe de territórios artificializados. Importa ainda notar que se prevê um aumento de 90% na área agrícola inundada para os eventos de origem marinha (FC1 e FC2).

Tabela 2.10 - Área marginal inundada (km²) e população residente diretamente afetada para os diferentes cenários.

Cenário	Área Marginal (km ²)	População residente
AC1	13.3	194
AC2	27.6	2450
AC3	22.7	116
AC4	37.2	605
AC5	57.6	4250
FRef	14.2	120
FC1	22.6	1209
FC2	45.8	4437
FC3	29.5	354
FC4	39.9	1307
FC5	65.9	5759

Estes resultados estão em linha com número de residentes diretamente afetados pelas inundações (Tabela 2.10), onde se verifica que o número de residentes diretamente afetados pelas inundações é maior para eventos de origem marinha do que de origem fluvial. Estima-se que o número de residentes diretamente afetados por eventos de origem marinha varia entre 194 e 2450, para eventos de 2 e 100 anos de período de retorno, respectivamente. Estes diminuem para 116 e 605 para eventos de

origem fluvial. Já para o clima futuro prevê-se que o número de residentes afetados por eventos de origem marinha aumente para 1290 e 4437, para períodos de retorno de 2 e 100 anos, respetivamente.

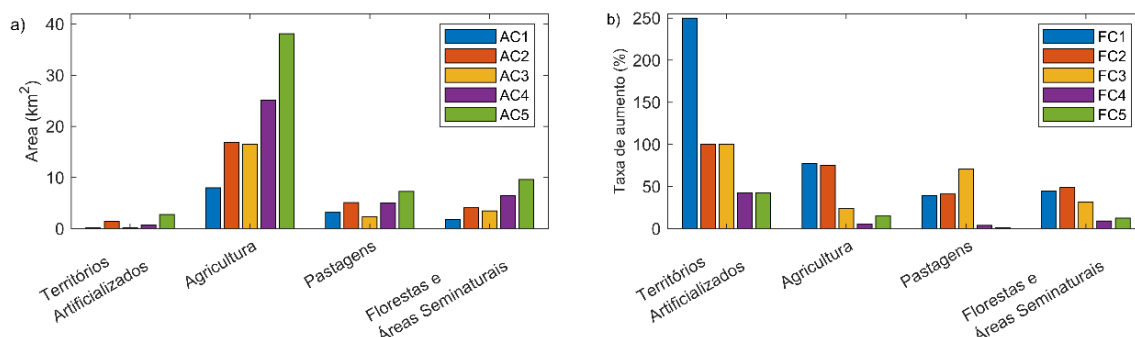


Figura 2.12 - a) Áreas de inundação de diferentes usos do solo para cada evento de inundação do clima atual. b) Taxa de aumento para cada evento do clima futuro relativamente ao correspondente do clima atual.

2.2.2.2 Medidas estruturais

Os resultados que recriam o efeito do Sistema de Defesa Contra as Marés na mitigação da intrusão salina na região do Baixo Vouga Lagunar, para eventos de origem marinha e de origem combinada, apresentam-se na Figura 2.13. Optou-se por descartar desta análise eventos de origem fluvial dado que o propósito da obra é a defesa da intrusão salina nos campos agrícolas. Para eventos de origem marinha (Figura 2.13a, b e c) verifica-se que a conclusão da obra reduz consideravelmente a extensão de inundação na região em todos os cenários. De facto, o sistema de proteção é eficaz para eventos extremos com um período de retorno de 100 anos, considerando o nível médio do mar atual (Figura 2.13a). No entanto, verifica-se que algumas áreas restritas adjacentes aos esteiros de Canelas e Salreu estão expostas a eventos de maior magnitude (Figura 2.13b) (100 anos de período de retorno com subida do nível médio do mar). Para os eventos de origem combinada (Figura 2.13d,e) verifica-se que a extensão de inundação com a implementação da obra é idêntica à obtida sem a implementação da obra evidenciando que a obra tem pouca influência na extensão de inundação. Uma análise mais detalha da Figura 2.13d, mostra inclusivamente que a obra de defesa dificulta a drenagem de água doce descarregada pelos rios Vouga e Antuã, ampliando a área inundada.

O efeito do reforço da margem sul do Rio Novo do Príncipe nos padrões de inundação de origem marinha e combinada encontra-se representado nos mapas da Figura 2.14. Os eventos de origem fluvial foram excluídos da análise, já que o propósito da obra é proteger a região da intrusão salina. A obra não afeta os padrões de inundação de eventos de origem combinada (Figura 2.14c,f), sendo notório apenas a sua influência

em eventos de origem marinha para períodos de retorno de 2 anos em condições de clima atual e futuro (Figura 2.14a, d).

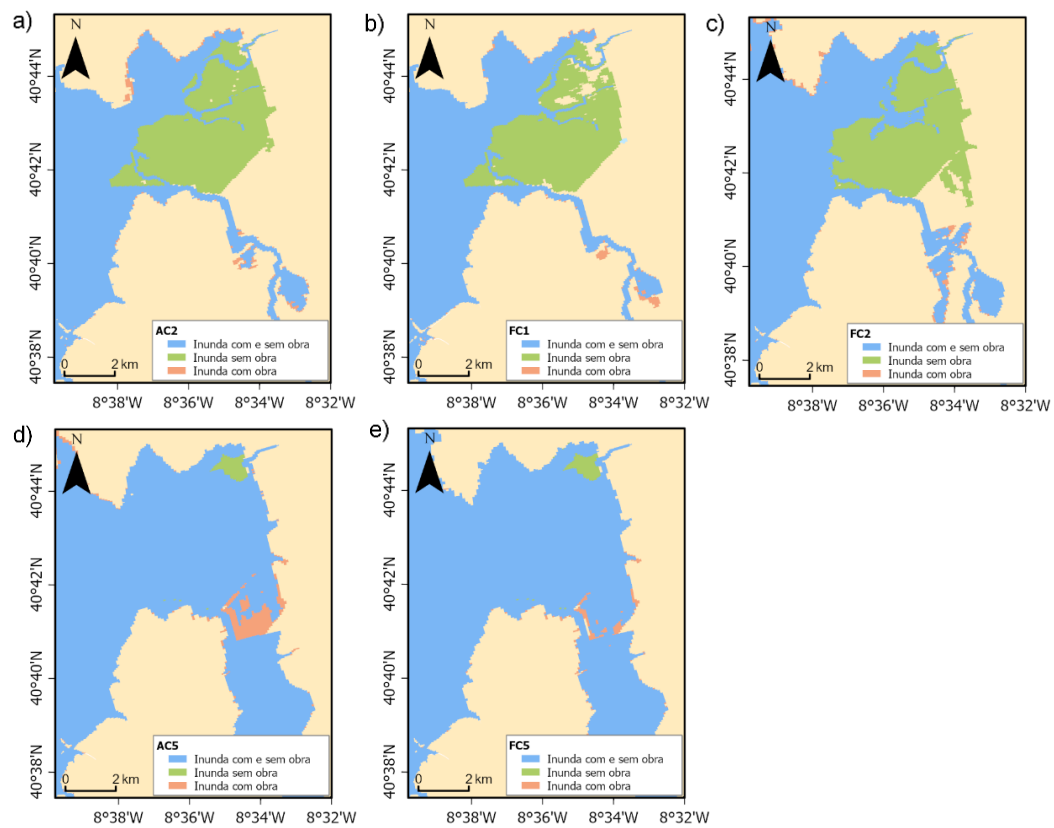


Figura 2.13 - Mapa de extensão de inundação com implementação de medidas de defesa para o Baixo Vouga Lagunar, para eventos de origem marinha (a, b, c) e combinada (d, e).

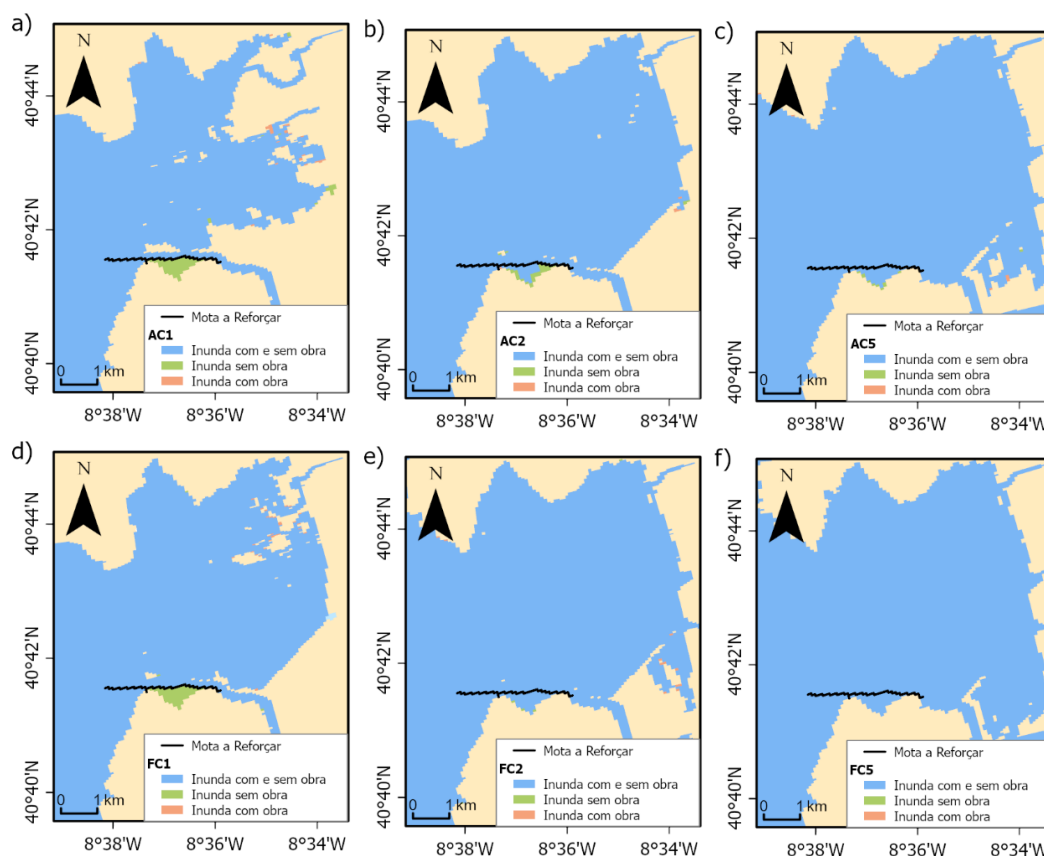


Figura 2.14 - Mapas de extensão de inundação com implementação da obra de reforço da margem sul do Rio Novo do Príncipe para eventos de origem marinha (a, b, d, e) e combinada (c, f).

O muro de contenção a implementar no Porto de Pesca do Largo de Aveiro pretende proteger a região adjacente de inundações frequentes originadas por níveis do mar elevados. Os resultados que recriam o seu efeito na extensão de inundação para eventos de origem marinha e de origem combinada (Figura 2.15), mostram que a obra é eficaz e protege toda a região adjacente de eventos extremos com 100 anos de período de retorno, tanto para o clima atual como para o clima futuro. Optou-se por descartar desta análise eventos de origem fluvial dado a região está fora da influência de eventos de origem fluvial.

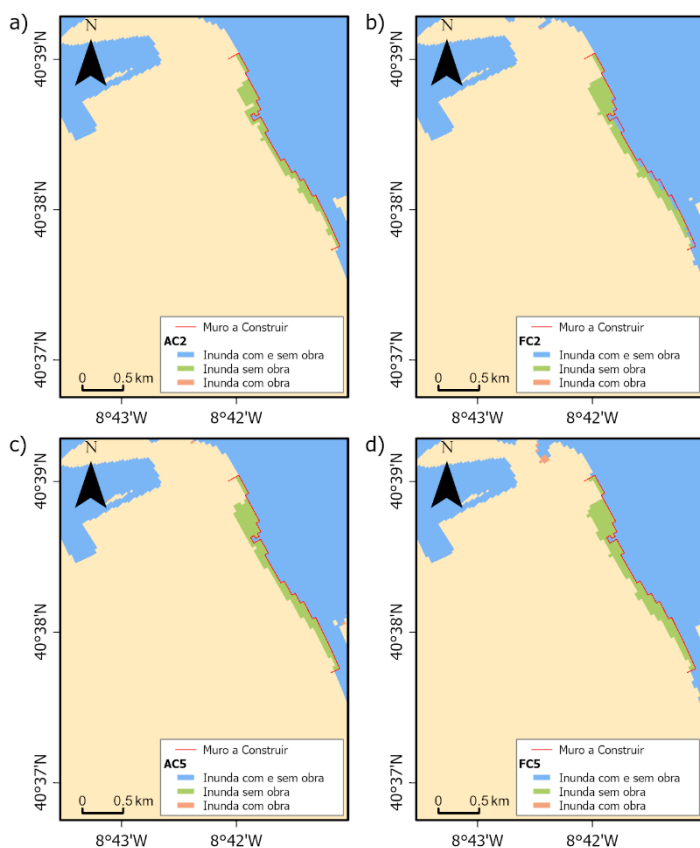


Figura 2.15 - Mapas de extensão de inundação com implementação do muro de contenção no Porto de Pesca do Largo de Aveiro para eventos de origem marinha (a, b) e combinada (c, d).

Na Figura 2.16 apresentam-se os mapas que mostram a influência da implementação de um novo terminal portuário na baía de São Jacinto para eventos de origem marinha e combinada. Optou-se por descartar desta análise eventos de origem fluvial dado que esta região não é afetada por estes eventos. Os mapas mostram que a obra tem um impacto muito reduzido na extensão de inundação, verificando-se em todos os cenários uma redução da inundação na região que será aterrada. Verifica-se ainda que para eventos de origem marinha com 100 anos de período de retorno (Figuras 13b, e) a extensão de inundação, na região de São Jacinto e nas regiões marginais ao canal de Mira, diminui como consequência da implementação da obra.

Os mapas que mostram a influência da rotura do cordão dunar na zona da Praia do Labrego nos padrões de inundação da Ria de Aveiro, encontram-se representados na Figura 2.17. Optou-se por descartar desta análise eventos de origem fluvial, já que a rotura do cordão dunar está associada a condições de agitação marítima extremas. Todos os mapas revelam que a rotura do cordão dunar tende a agravar a extensão de inundação nas regiões adjacentes ao ponto de rotura. É de destacar a elevada extensão de inundação para os cenários FC2 e AC5 (Figura 2.17b, c, respetivamente).

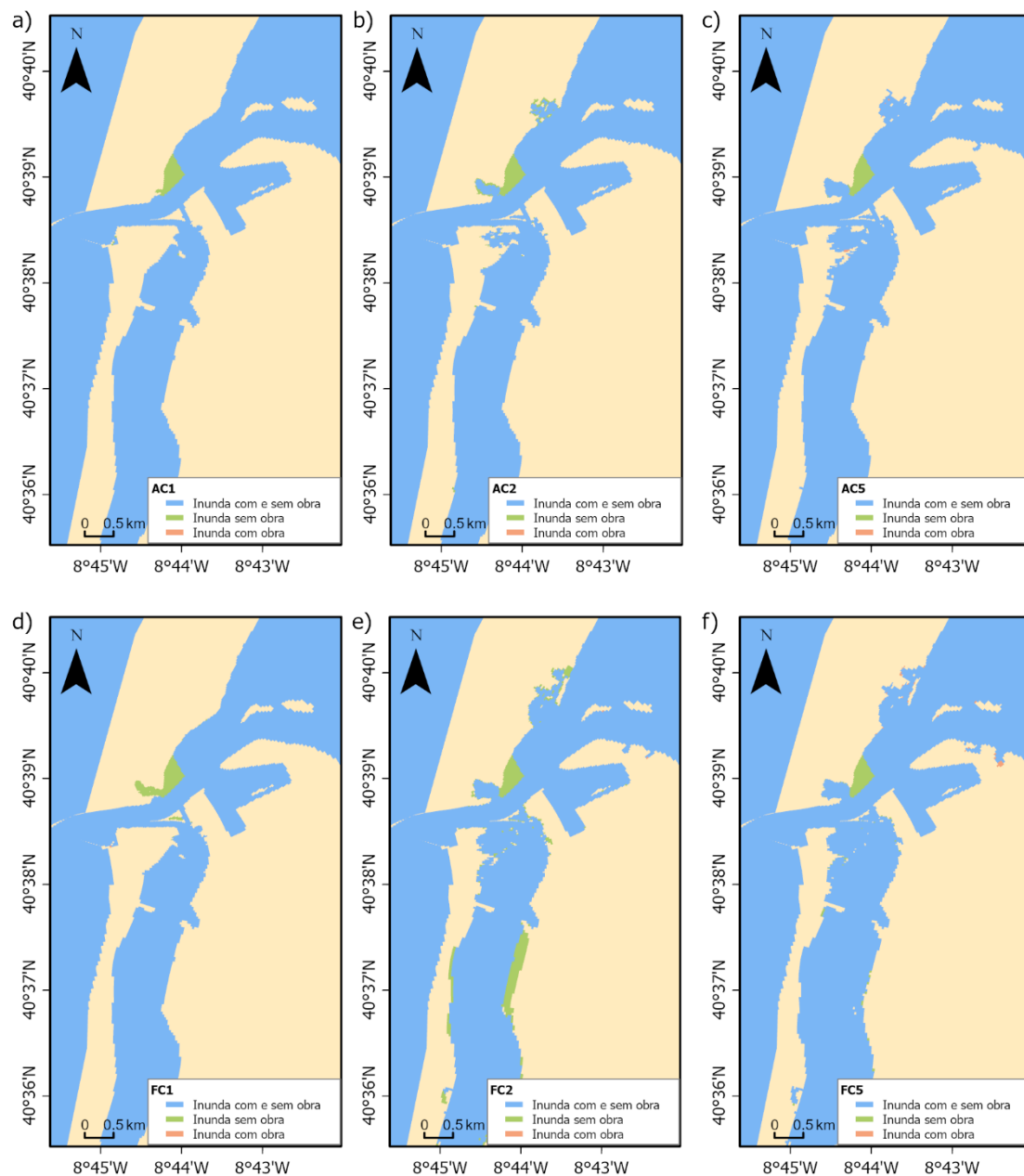


Figura 2.16 - Mapas de extensão de inundação com implementação do novo terminal portuário na baía de São Jacinto para eventos de origem marinha (a, b, d, e) e combinada (c, f).

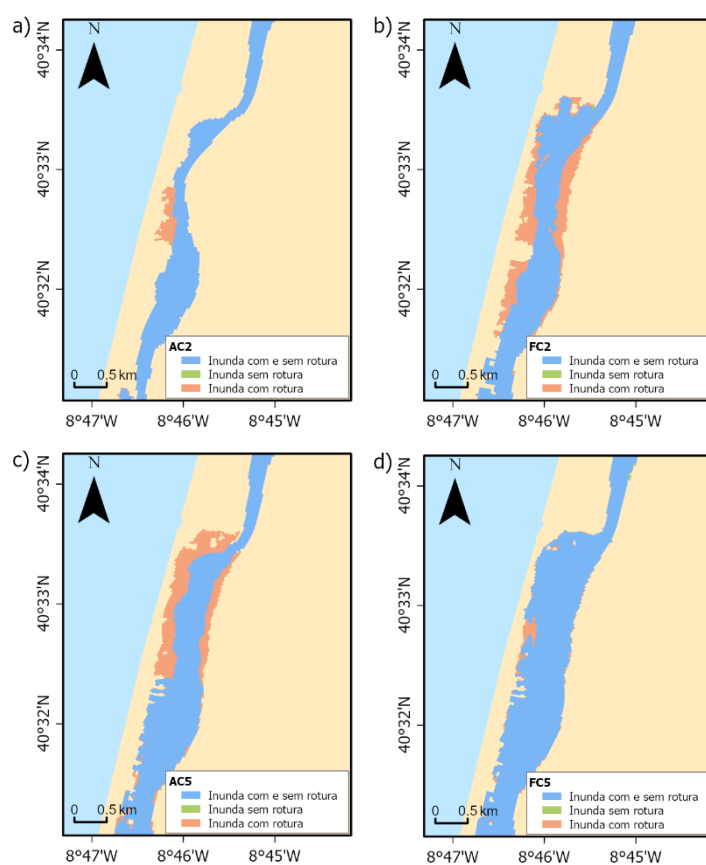


Figura 2.17 - Mapas de extensão de inundação com a implementação de rotura do cordão dunar a sul da Praia do Labrego para eventos de origem marinha (a, b) e combinada (c, d).

3 Principais Conclusões

A caracterização dos eventos causadores de inundação revelou que a maré astronómica é o fator que mais influencia o nível da água da laguna. A análise efetuada ao registo maregráfico da Barra revelou uma tendência de subida dos níveis de PMAV e do nível médio do mar confirmando a tendência de avanço do nível do mar. Concluiu-se ainda que depressões atmosféricas podem gerar na região sobre-elevações do nível do mar entre 0.5 e 1.09 m, contudo estas só têm efeito na inundação do território se ocorrerem em situação de maré viva. Prevê-se que a influência dos agentes de origem marinha se intensifique no futuro devido às alterações climáticas, sendo expectável um aumento do nível médio do mar de 0.22 m para 2045. A agitação marítima tende a aumentar no futuro, embora não seja expectável uma mudança significativa das suas características. A altura significativa e o período de pico para os diferentes períodos de retorno são semelhantes aos observados no período histórico analisado. No entanto, a direção média das ondas deverá mudar ligeiramente no futuro, de 355° para 345°. Conclui-se que os caudais fluviais têm um efeito menor no estabelecimento do nível da água quando comparados com o efeito da maré astronómica, contudo as descargas fluviais aumentam com a passagem de tempestades e causam inundações nos territórios adjacentes à foz dos rios. Da análise efetuada conclui-se que o rio Vouga representa a maior afluência de água doce na laguna, sendo estimado um caudal máximo de 1943 m³/s para um período de retorno de 100 anos e uma redução dos caudais de ponta de cheia de todos os afluentes em situação de alteração climática.

A análise à cartografia de inundação revelou que os territórios agrícolas e de pastagens do Baixo Vouga Lagunar apresentam elevada exposição a eventos, quer de natureza marinha, quer fluvial. A inundação provocada por eventos de origem marinha afeta também territórios artificializados localizados próximo da embocadura da laguna (municípios de Ílhavo e Aveiro) e no extremo Norte da laguna (município de Ovar). A influência dos eventos de origem fluvial está praticamente circunscrita aos territórios agrícolas e pastagens adjacentes à foz dos rios, tendo estes eventos pouca influência nos territórios artificializados. Ainda assim, convém destacar que estes representam maior perigo para a população dado os elevados valores de profundidade de inundação. Os resultados revelam ainda que a população residente está mais exposta a eventos de origem marinha do que fluvial, e que os eventos de origem combinada são os mais graves, podendo afetar territórios não inundados por eventos fluviais ou marinhos isoladamente. Para o clima futuro, prevê-se um aumento da extensão de inundação em resposta à subida do nível médio do mar, particularmente para eventos de origem

marinha, sendo os territórios artificializados, os que verificam maiores aumentos percentuais. Como consequência o número de residentes diretamente afetados pelas inundações deverá aumentar no clima futuro, podendo afetar até 4437 residentes, para eventos de origem marinha com períodos de retorno de 100 anos.

Este estudo demonstrou que a modelação hidrodinâmica é uma ferramenta útil e capaz de prever com rigor a eficácia de medidas estruturais na extensão de inundação. Concluiu-se que o sistema de defesa contra as marés reduz eficazmente as inundações de origem marinha na região do Baixo Vouga Lagunar, contudo o reforço da margem esquerda do Rio Novo do Príncipe revelou-se eficaz apenas para eventos com períodos de retorno de 2 anos. O muro de contenção a implementar no Porto de Pesca do Largo de Aveiro é eficaz e protege toda a região adjacente de eventos extremos com 100 anos de período de retorno, tanto para o clima atual como para o clima futuro. A análise da extensão do porto de Aveiro para São Jacinto revela que a obra tem uma influência reduzida nos padrões de inundação da laguna, sendo apenas prevista uma ligeira diminuição da extensão de inundação para eventos de origem marinha de 100 anos de período de retorno em algumas regiões à entrada do canal de Mira. Por fim, os resultados numéricos indicam que a rotura do cordão dunar a Sul da praia do Labrego tende a agravar a extensão de inundação apenas nas regiões adjacentes ao local da rotura.

Atendendo aos resultados obtidos e com o objetivo de mitigar os riscos identificados recomenda-se:

1. *Aplicar a metodologia desenvolvida aos sistemas estuarinos portugueses ameaçados por inundações*

A metodologia desenvolvida revelou-se eficiente na avaliação rigorosa do risco de inundação e deverá ser adotada aos sistemas estuarinos portugueses identificados como Áreas de Risco Potencial Significativo de Inundação (ARPSI). O envolvimento dos agentes de proteção civil, gestores do território e comunidade local no processo de criação e validação da cartografia de inundação aumentou a confiança e aceitação nos resultados obtidos.

2. *Usar a cartografia de inundação como suporte ao planeamento do território*

A cartografia de inundação deve ser incorporada nos instrumentos de planeamento territorial, como planos diretores, planos de ordenamento do território, planos de emergência e planos de gestão de riscos de inundação.

3. *Aumentar a resolução espacial da cartografia de inundação das regiões vulneráveis*

Conhecer com maior rigor e detalhe espacial a vulnerabilidade dos territórios expostos ao perigo de inundação potenciará o desenvolvimento de planos de gestão de riscos mais eficazes e adaptados às características locais.

4. Melhorar a qualidade e resolução dos dados de base

É imperativo implementar um plano de monitorização contínua e sistemática que permita conhecer com rigor as afluências de água doce na Ria de Aveiro e restantes ARPSI. Ademais, levantamentos topográficos e batimétricos atuais e de elevada resolução potenciarão a obtenção de cartografia de inundação mais rigorosa.

5. Usar a modelação hidrodinâmica para avaliar a eficiência de medidas de proteção

A modelação hidrodinâmica é uma ferramenta essencial para o desenho, avaliação e otimização de medidas de proteção contra inundações, permitindo simular o percurso da inundação em diferentes cenários, auxiliando na tomada de decisões mais rigorosas e eficazes.

6. Implementar um sistema de alerta de eventos extremos de inundação

Um sistema de alerta baseado em modelação hidrodinâmica que forneça antecipadamente a extensão de inundação, apoiará os agentes de proteção civil na gestão de eventos extremos e potenciará maior segurança à comunidade.

Referências

- Cavalinhos R, Correia R, Rosa P, Lillebo A, Pinheiro LM. 2020. *Processed multibeam bathymetry data collected around the Ria de Aveiro, Portugal, onboard the NEREIDE research vessel*. Aveiro. DOI: 10.5281/zenodo.4095175
- Lopes C. L. 2016. Flood risk assessment in Ria de Aveiro under present and future scenarios. Aveiro, University of Aveiro
- Lopes CL, Alves FL, Dias JM. 2017. Flood risk assessment in a coastal lagoon under present and future scenarios: Ria de Aveiro case study. *Natural Hazards* **89**: 1307–1325. DOI: 10.1007/s11069-017-3025-x
- Lopes CL, Sousa MC, Ribeiro A, Pereira H, Pinheiro JP, Vaz L, Dias JM. 2022. Evaluation of future estuarine floods in a sea level rise context. *Scientific Reports* **12**: 8083. DOI: 10.1038/s41598-022-12122-7
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TDE. *Computers and Geosciences* **28**: 927–937. DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4
- Pinheiro JP, Lopes CL, Ribeiro AS, Sousa MC, Dias JM. 2020. Tide-surge interaction in Ria de Aveiro lagoon and its influence in local inundation patterns. *Continental Shelf Research* **200**: 104132. DOI: 10.1016/j.csr.2020.104132
- Pugh DT. 2004. *Changing Sea Levels*. Cambridge University Press
- Ribeiro A, Costoya X, de Castro M, Carvalho D, Dias JM, Rocha A, Gomez-Gesteira M. 2020a. Assessment of Hybrid Wind-Wave Energy Resource for the NW Coast of Iberian Peninsula in a Climate Change Context. *Applied Sciences* **10**: 7395. DOI: 10.3390/app10217395
- Ribeiro AS, deCastro M, Costoya X, Rusu L, Dias JM, Gomez-Gesteira M. 2021a. A Delphi method to classify wave energy resource for the 21st century: Application to the NW Iberian Peninsula. *Energy* **235**: 121396. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121396
- Ribeiro AS, deCastro M, Rusu L, Bernardino M, Dias JM, Gomez-Gesteira M. 2020b. Evaluating the Future Efficiency of Wave Energy Converters along the NW Coast of the Iberian Peninsula. *Energies* **13**: 3563. DOI: 10.3390/en13143563
- Ribeiro AS, Lopes CL, Sousa MC, Gomez-Gesteira M, Dias JM. 2021b. Flooding conditions at aveiro port (Portugal) within the framework of projected climate change. *Journal of Marine Science and Engineering* **9**. DOI: 10.3390/JMSE9060595
- Ribeiro AS, Lopes CL, Sousa MC, Gómez-Gesteira M, Vaz N, Dias JM. 2023. Reporting Climate Change Impacts on Coastal Ports (NW Iberian Peninsula): A Review of

Flooding Extent. *Journal of Marine Science and Engineering* **11**: 477. DOI:
10.3390/jmse11030477