



METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES COSTEIRAS NA COSTA NORTE PORTUGUESA

José Eduardo Carneiro-Barros^{1,2}; Tiago Fazerres-Ferradosa^{1,2}; Paulo Rosa-Santos^{1,2}; Francisco Taveira-Pinto^{1,2}

¹ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto; ² Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR).

up202204079@fe.up.pt

Introdução

A costa portuguesa possui um clima de agitação marítima energético associado a uma linha de costa densamente ocupada. Ativos privados e públicos, bem como infraestruturas críticas, concentram-se junto ao litoral, lado a lado com obras de defesa como quebra-mares, molhes, esporões e trechos alimentados artificialmente. Esta combinação de forte ocupação humana, infraestruturas, e um regime de agitação marítima energético é ainda pressionada pelas alterações climáticas — subida do nível do médio dos oceanos e mudanças na frequência e intensidade dos eventos extremos —, resultando num aumento dos episódios de galgamento, inundação e erosão em vários locais.

As obras de engenharia reduziram o risco em diversos pontos, mas os galgamentos persistem em hotspots consolidados. Construir, manter e reforçar estas estruturas é dispendioso e exige projeto apoiado em conhecimento sólido da geomorfologia local e das condições oceânicas. Sem esse suporte, as intervenções podem ter um desempenho aquém do esperado, transferir o risco ao longo da costa ou criar novas exigências de manutenção. Os troços naturais também estão sob pressão. Pois os sistemas dunares erodem, perdem-se habitats e diminui a capacidade das praias e dunas para absorverem a energia das tempestades. Estas mudanças fragilizam a proteção natural das comunidades vizinhas e evidenciam a ligação estreita entre os serviços ecossistémicos e as decisões humanas ao longo da costa.

Uma gestão eficaz dos riscos costeiros requer uma leitura clara dos processos que aumentam os níveis de água e desencadeiam inundações, tanto em frentes urbanizadas e defendidas como em trechos naturais. Em termos operacionais, essa leitura deve centrar-se nos Níveis Totais de Água (*Total Water Levels* - TWL), integrando de forma coerente a maré astronómica, a sobrelevação meteorológica e o contributo das ondas (espraiamento ou *runup*). No contexto português, dominado por tempestades do Atlântico Norte, a componente das ondas assume frequentemente um papel determinante nos episódios de galgamento, e não deve ser negligenciada.

Estudos detalhados, específicos para casos de estudo em escala local, são valiosos para compreender os processos e dimensionar soluções personalizadas para um contexto particular, mas não bastam por si só. Falta uma abordagem em escala mais ampla, capaz de oferecer um retrato consistente através de contextos geomorfológicos variados e de se manter prática e precisa. Uma avaliação regional deve respeitar a diversidade geográfica e de exposição da costa portuguesa, ao mesmo tempo que cria pontes entre o detalhe local e o planeamento municipal, regional e nacional, identificando hotspots presentes e emergentes e apoiando a priorização de ações em condições atuais e futuras.

A costa Norte portuguesa é um caso particularmente exigente e representativo: combina frentes urbanas defendidas e trechos naturais expostos, múltiplas embocaduras fluviais e um histórico documentado de eventos costeiros danosos induzidos por ondas. Este mosaico oferece o contexto ideal para testar soluções que conciliem coerência física, cobertura espacial alargada e custos computacionais reduzidos, requisitos indispensáveis para rotinas de monitorização e planeamento.

Face a estes desafios, este trabalho apresenta e demonstra um framework robusto e escalável para a avaliação regional do risco costeiro centrado em séries temporais de TWL, aplicado à costa Norte e preparado para uma futura extensão à escala nacional (Carneiro-Barros *et al.*, 2024). O framework integra processamento geoespacial, modelação numérica, técnicas de



machine learning (Carneiro-Barros, *et al.*, 2023), observações in situ e dados de deteção remota, controlando as exigências do esforço computacional e de recursos humanos e financeiros. Tem como objetivos (i) estimar TWL de forma fisicamente consistente e eficiente, (ii) produzir outputs orientados à decisão — como tipificação de regimes de swash e indicadores de hotspots atuais e emergentes —, e (iii) quantificar, de forma pragmática, os efeitos das alterações climáticas (eventos extremos e subida do nível médio do mar) no risco de inundação. Os resultados são disponibilizados através de uma plataforma geoespacial de fácil acesso e leitura por autoridades e demais interessados, facilitando a hierarquização de estudos e intervenções.

Metodologia

A presente abordagem metodológica oferece uma visão geral integrada, centrada na escala regional. Um caso local (Furadouro) foi usado noutro trabalho do autor para ensaiar técnicas de mapeamento das inundações (Carneiro-Barros, 2023), mas aqui o foco é a aplicação sistemática ao longo da costa Norte portuguesa.

A avaliação de inundações costeiras segue um esquema comum que parte da caracterização das condições de fronteira que impulsionam as inundações. Neste estudo, a condição de fronteira é o Nível Total de Água (TWL). Estimam-se primeiro, de forma independente, os três contributos principais — maré astronómica (T), sobrelevação meteorológica (S) e runup das ondas (R2) — e, em seguida, combina-se $TWL = T + R2 + S$ numa série temporal contínua para análise.

Portanto, uma série contínua de TWL com 45 anos e resolução de 2 h para a costa Norte foi construída. As marés astronómicas são extraídas de uma base global (Delft Dashboard – IHO) e validadas face ao marégrafo de Leixões. A sobrelevação meteorológica resulta da diferença entre o nível do mar observado e a maré prevista; lacunas e descontinuidades são reconstruídas com um modelo de rede neuronal (LSTM), garantindo consistência para análises de extremos robustas. A contribuição das ondas é representada pelo runup. As condições ao largo provêm de uma reanálise global e são usadas como fronteira de uma aplicação regional do SWAN. Os campos de onda em águas costeiras são inversamente propagados para obter parâmetros de águas profundas requeridos por fórmulas empíricas de runup. Um teste de sensibilidade entre expressões estabelecidas foi realizado e adotou-se a formulação de Stockdon para a região de estudo.

A caracterização morfológica baseia-se nos Modelos Digitais de Terreno (DTM) de alta resolução (Lidar e aerofotogrametria), fornecidos pela Direção Geral do Território (DGT). Uma rotina em Python define transectos perpendiculares à costa, espaçados em 200–300 m, a partir dos quais acede às elevações no DTM e se extraem informações fundamentais, como as cotas do pé da duna, da crista da duna (CT), a posição da linha de costa e a inclinação do perfil da praia. A inclinação é usada nos cálculos de runup para captar a variabilidade espacial dos perfis ao longo da costa Norte. A CT pode ser considerada como a cota de inundação, podendo ser tanto o topo de uma duna como o coroamento de uma estrutura de defesa aderente, e demarca o ponto a partir do qual se caracteriza um galgamento.

Com a série temporal do TWL reconstruída, classificam-se os regimes de espraiamento (swash, collision, overwash) pela comparação entre TWL e as cotas do pé e topo da duna (Carneiro-Barros *et al.*, 2025). Define-se o potencial de overwash como $OP = TWL - CT$, indicador direto de suscetibilidade a inundação por galgamento. A reconstrução de TWL e os mapas de regimes são verificados com registos/documentação de ocorrências de perigo costeiro na região, realizados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), assegurando uma validação robusta.

Por fim, aplica-se uma análise univariada de valores extremos às séries de TWL. As amostragens por Peaks-Over-Threshold (POT) e Block Maxima (BM) são avaliadas em paralelo e testam-se várias distribuições para estimar níveis de retorno fiáveis. Os cenários de subida do nível médio do mar são sobrepostos às séries para quantificar alterações na frequência de extremos e possíveis transições entre regimes de swash. Os outputs incluem mapas de níveis de retorno, probabilidades de excedência e potencial de overwash, destinados a identificar hotspots regionais e a alimentar uma plataforma geoespacial de apoio à decisão.



Resultados

As séries temporais de TWL foram reconstruídas para aproximadamente 400 transectos ao longo de cerca de 120 km da costa Norte, permitindo captar a variabilidade espacial do contributo das marés, da sobrelevação meteorológica e do runup em cada contexto geográfico. No clima atual, a classificação de regimes indica predomínio de condições de swash e collision, com segmentos de overwash em zonas críticas. A coerência espacial entre estes padrões e registos de ocorrências de galgamento conhecidos (e.g., Furadouro) fornece uma validação qualitativa do mapeamento.

O OP, mapeado ao longo da costa, evidencia hotspots onde as variações do TWL são suficientes para ultrapassar cotas críticas. Estes hotspots tendem a ocorrer em praias estreitas com inclinação elevada e/ou cotas de inundação baixas, gerando gradientes acentuados de risco entre segmentos adjacentes. A figura 1 (esquerda) mostra o OP para um TWL com período de retorno de 50 anos, o que seria aproximadamente as condições da tempestade Hércules de 2014, a qual gerou grandes impactos na costa.

Sob cenários de subida do nível médio do mar (SLR), a frequência dos extremos de TWL aumenta de forma significativa. Mesmo no cenário otimista (baixo SLR), um TWL como o da tempestade Hércules, passaria de um período de retorno de 50 anos para um de 5–10 anos; no cenário médio, 2–5 anos; e, no cenário alto, ocorreria anualmente ou bienalmente. Para além disso, o SLR eleva a linha de base sobre a qual o TWL se estabelece e pode ampliar ligeiramente os picos — um “duplo efeito” que se traduz sobretudo num aumento da frequência de ocorrência. O SLR altera também os regimes de swash. Em regimes médios anuais, para SLR elevado (+0.91 m), o domínio de swash diminui ($\approx 85.0\% \rightarrow 73.6\%$), collision aumenta consideravelmente ($\approx 12.0\% \rightarrow 22.7\%$) e o overwash duplica ($\approx 0.7\% \rightarrow 1.5\%$). A sazonalidade é determinante: no Verão, o swash mantém-se dominante, embora com aumento de collision ($\approx 3.8\% \rightarrow 9.7\%$); no Inverno as mudanças são mais pronunciadas, com swash a diminuir ($\approx 74.9\% \rightarrow 58.7\%$), collision a subir ($\approx 21.3\% \rightarrow 35.9\%$) e overwash a duplicar ($\approx 1.5\% \rightarrow 3.1\%$). Estes deslocamentos de regime fazem emergir/expandir hotspots em troços como Viana do Castelo–Esposende, Póvoa de Varzim e Furadouro, afetando atividades e infraestruturas costeiras e exigindo planeamento e priorização de intervenções com enfoque sazonal.

Conclusões

Este estudo apresenta uma abordagem regional sólida que preenche o espaço entre avaliações globais, demasiado genéricas para orientar ações locais, e estudos locais, detalhados mas difíceis de escalar. O framework, aplicado à costa Norte, harmoniza séries longas de forçamento oceânico com morfologia específica por transecto e produz resultados consistentes ao longo de cerca de 120 km, mantendo custos computacionais e de dados compatíveis com rotinas de planeamento. A sua estrutura modular permite uma extensão sistemática a toda a costa portuguesa.

Do ponto de vista técnico-científico, o trabalho introduz um grau elevado de inovação na forma de calcular TWL, integrando de modo fisicamente consistente $T + R2 + S$ em séries temporais contínuas, com runup parametrizado a partir de declives locais por transecto e “reverse shoaling” das condições de agitação marítima. Esta formulação univariada, pragmática e eficiente, facilita a incorporação de cenários de alterações climáticas (subida do nível médio do mar e mudanças na frequência de extremos) e suporta análises de valores extremos robustas sem depender de cadeias de modelos de dados multivariados pesadas. O resultado é um conjunto de métricas comparáveis (regimes de swash, potencial de overwash, períodos de retorno e probabilidades de excedência) que capturam a sensibilidade climática com rigor e eficiência.

Em termos operacionais, o framework fornece apoio direto à decisão através de uma plataforma geoespacial de fácil uso e leitura por autoridades e demais interessados. Os outputs permitem priorizar intervenções, hierarquizar estudos locais e planejar monitorização sazonal onde a sensibilidade é maior. A combinação de rigor físico e eficiência computacional torna a abordagem adequada para usos recorrentes e para uma escala nacional, abrindo caminho a integrações futuras com previsões operacionais e mapeamento 2D de inundação em hotspots.

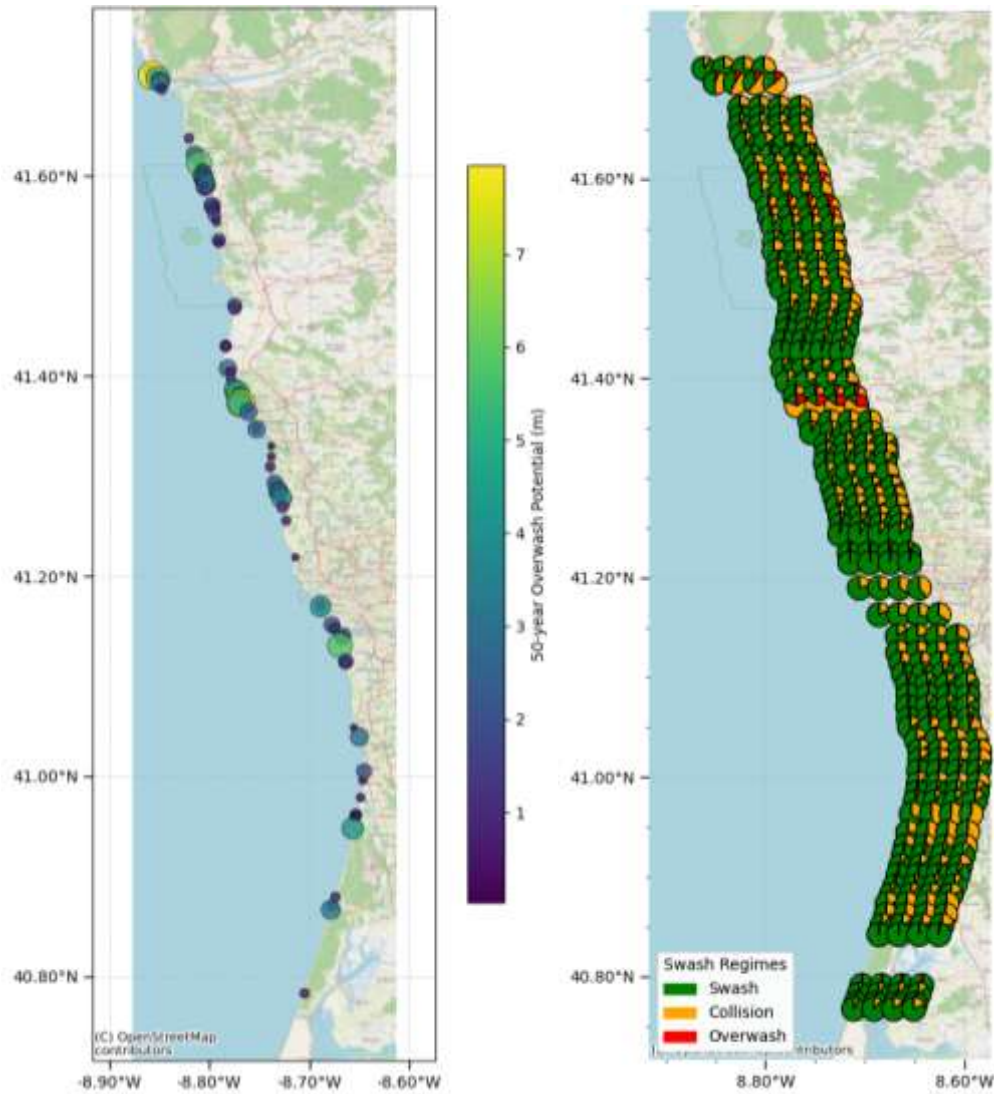


Figura 1. Potencial de Overwash (esquerda), e regimes de swash face a diferentes cenários de aumento do nível médio do mar (direita).

Referências Bibliográficas

- Carneiro-Barros, J. E., Plomaritis, T. A., Fazeres-Ferradosa, T., Rosa-Santos, P., e Taveira-Pinto, F. (2023). "Coastal Flood Mapping with Two Approaches Based on Observations at Furadouro, Northern Portugal". *Remote Sensing*, 15, 5215. <https://doi.org/10.3390/rs15215215>
- Carneiro-Barros, J. E., Fazeres-Ferradosa, T., Rosa-Santos, P., (2023). "Machine Learning Applied to Wave Hindcasting and Propagation". In: 40th IAHR World Congress — Rivers: Connecting Mountains and Coasts. Vienna: IAHR.
- Carneiro-Barros, J. E., Fazeres-Ferradosa, T., Rosa-Santos, P., e Taveira-Pinto, F. (2024). "A Systematic Approach to Assess Wave Overtopping at a Regional Scale: The Northern Portuguese Coast". In: International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2024). Rome: ICCE.
- Carneiro-Barros, J. E., Majidi, A. G., Plomaritis, T., Fazeres-Ferradosa, T., Rosa-Santos, P., e Taveira-Pinto, F. (2025). "Coastal Flooding Hazards in Northern Portugal: A Practical Large-Scale Evaluation of Total Water Levels and Swash Regimes". *Water*, 17(10), 1478. <https://doi.org/10.3390/w17101478>