



AVALIAÇÃO DE MODELO DE REDES NEURONAIS PARA MONITORIZAÇÃO DE LONGO PRAZO DO FUNDO MARINHO ATRAVÉS DE IMAGENS SENTINEL-2

Rúben Santos; Luísa Lamas; Cristina Monteiro; Marina Miranda; Carlos Rubrio Marques
Instituto Hidrográfico

ruben.santos@hidrografico.pt, luisa.lamas@hidrografico.pt, cristina.monteiro@hidrografico.pt,
marina.miranda@hidrografico.pt, videira.marques@hidrografico.pt.

Resumo

Neste estudo avaliou-se a capacidade de generalização temporal de um modelo de redes neuronais para estimar batimetria em zonas costeiras de baixa profundidade. A análise baseou-se em 31 imagens Sentinel-2 (2018–2019), complementadas com observações maregráficas de Setúbal–Tróia e dados de agitação marítima da boia costeira de Sines. Cada imagem originou uma superfície batimétrica reduzida ao Zero Hidrográfico, permitindo construir uma série temporal coerente de profundidades.

A validação foi feita com dados da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) de 2018, 2019 e 2020. Os maiores desvios coincidiram com períodos de forte agitação marítima, sugerindo alterações do fundo marinho e/ou maior concentração de partículas em suspensão. Os resultados demonstram a robustez do modelo e a sua relevância para aplicações de monitorização batimétrica de longo prazo.

Introdução

Desde 2004, Portugal está comprometido com a cobertura batimétrica de toda a área sob jurisdição nacional, tendo já alcançado mais de 65% da cobertura pretendida. No entanto, grande parte deste esforço incidiu sobre regiões de maior profundidade. Para assegurar uma cobertura completa do fundo marinho, incluindo as zonas costeiras de baixa profundidade, o Instituto Hidrográfico (IH) tem desenvolvido estudos no âmbito da Batimetria Derivada por Satélite (SDB), recorrendo a metodologias mais ajustadas a estas áreas mais dinâmicas e desafiadoras.

Numa fase inicial, o IH estudou de forma aprofundada o algoritmo de Stumpf et al. (2003), que determina a profundidade através de uma regressão linear entre os rácios dos logaritmos de duas bandas espectrais e a profundidade obtida por dados in-situ.

Mais recentemente, têm sido aplicados algoritmos de inteligência artificial (IA) capazes de capturar padrões não-lineares entre as reflectâncias e a profundidade, com o objetivo de melhorar a estimativa da batimetria em zonas costeiras de baixa profundidade ao longo do litoral português recorrendo a dados multiespectrais.

Os modelos de IA depois de treinados, podem ser aplicados sem recorrer novamente a dados in-situ, desde que demonstrem capacidade de generalização espacial ou temporal.

O presente estudo avalia o modelo de Redes Neuronais (RN) publicado por Santos et al. (2025) para a região de Setúbal–Tróia (Figura 1), utilizando dados independentes (2018 e 2019), distintos do conjunto de treino (2021), para testar a sua generalização temporal e, consequentemente, a viabilidade da sua aplicação em programas de monitorização costeira de longo prazo.

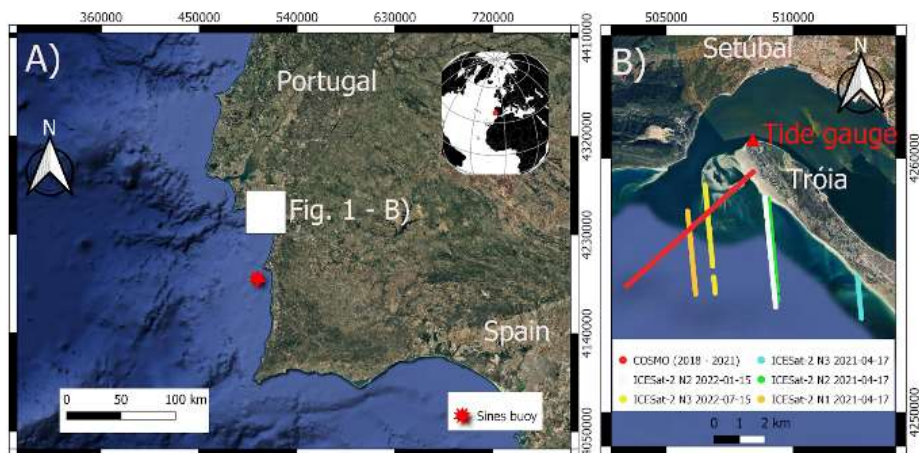


Figura 1. A) O quadrado branco representa a localização da área de estudo e boia costeira de Sines. B) Localização do marégrafo (Tide gauge), dados batimétricos, APA (linha vermelha). A informação das restantes linhas não foi utilizada neste estudo.

Dados e métodos

Modelo

O modelo espaço-temporal utilizado consiste numa rede neuronal densa que estima profundidade a partir das coordenadas geográficas (latitude, longitude), das reflectâncias multispectrais (bandas B1–B4 do Sentinel-2) e das datas de aquisição (dia juliano), tendo sido treinado com dados adquiridos em 2021 (Santos et al., 2025).

Imagens multi-espectrais Sentinel-2 (S2)

Para verificar a capacidade de generalização temporal deste modelo foram seleccionadas 12 imagens dos satélites Sentinel-2 de 2018 e 19 imagens de 2019, com o nível de processamento 2A, ou seja, corrigidas do efeito da atmosfera. O processamento destas imagens seguiu as mesmas correções e filtros aplicados aos dados de treino (Santos et al., 2025), de forma a obter as reflectâncias da região de água, tal como a informação temporal e espacial.

Dados Batimétricos

Os dados batimétricos utilizados no processo de validação foram disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Estes dados foram adquiridos através de levantamento topobatimétrico ao longo de uma fiada de feixe simples, representada pela linha vermelha da Figura 2B. Estes levantamentos ocorreram nos dias 29 de dezembro de 2018, 23 de maio de 2019 e 7 de fevereiro de 2020 (Figura 1B).

Agitação marítima

Os dados de agitação marítima da boia costeira de Sines (Figura 1A) foram utilizados neste estudo de forma a verificar se o estado do mar afeta o processo de validação.

Devido à configuração geológica da região os dados seleccionados encontram-se no quadrante Sul – Oeste, ou seja, utilizamos apenas a ondulação vinda de Sul – Oeste, e foi realizado um controlo de qualidade para remover dados considerados inválidos”.

Metodologia

As profundidades foram estimadas com o modelo RN, gerando superfícies de batimetria SDB para a região de Setúbal–Tróia. Com base nos registos do marégrafo de Setúbal–Tróia, os valores de profundidade SDB foram reduzidos ao Zero Hidrográfico, assegurando que a



compatibilidade com o datum vertical dos dados de referência (APA).

A comparação entre os resultados SDB e os dados topo-batimétricos da APA foi efetuada em função da proximidade temporal entre os dados e o instante de aquisição de cada imagem, tendo sido calculado o respetivo *Root Mean Square Error* (RMSE) para cada um dos seguintes grupos (tabela 1).

Tabela 1 – Dados utilizados no cálculo do RMSE, em função da proximidade temporal.

Dados topo-batimétricos APA	Sentinel-2
2018-12-29	2018-09-02 até 2019-03-11
2019-05-23	2019-03-16 até 2019-09-27
2020-02-07	2019-10-22 até 2020-12-30

Por fim, a relação temporal entre o RMSE e a agitação marítima foi analisada através da observação da correlação entre os picos do RMSE e as condições de mar mais energético, tendo em atenção à informação utilizada para o cálculo do RMSE, ou seja, as datas de aquisição das imagens e levantamento topo-batimétrico. Em algumas situações pode verificar-se que os dados do levantamento topo-batimétrico, foi realizado após eventos de agitação marítima.

Resultados

Os SDBs permitiram gerar perfis verticais ao longo da fiada topo-batimétrica da APA (Figuras 2 e 3). Na Figura 2A apresentam-se os resultados obtidos em períodos sem agitação marítima significativa. As profundidades estimadas encontram-se, de forma geral, bem distribuídas em torno das profundidades de referência, exceto na zona de menor profundidade, onde se verifica uma tendência para valores sobrestimados face ao perfil topo-batimétrico da APA. Já na Figura 2B, correspondente a períodos com registo de agitação marítima (Figura 2C), todas as profundidades estimadas revelam valores superiores aos de referência, com um desfasamento mais pronunciado nas regiões de baixa profundidade.

Na Figura 3, a descrição segue a lógica da figura anterior, destacando-se uma maior dispersão das profundidades (Figura 3A) e o impacto mais evidente da agitação marítima nas estimativas batimétricas (Figura 3B). No final da série temporal (Figura 3C, retângulo azul), observa-se uma região onde, apesar da forte agitação marítima, o RMSE permanece estável em torno de ~1,0 m; esta situação resulta da alteração dos dados de referência usados no cálculo do RMSE, uma vez que o perfil topo-batimétrico mais próximo destas datas corresponde ao levantamento de 2020-02-07.

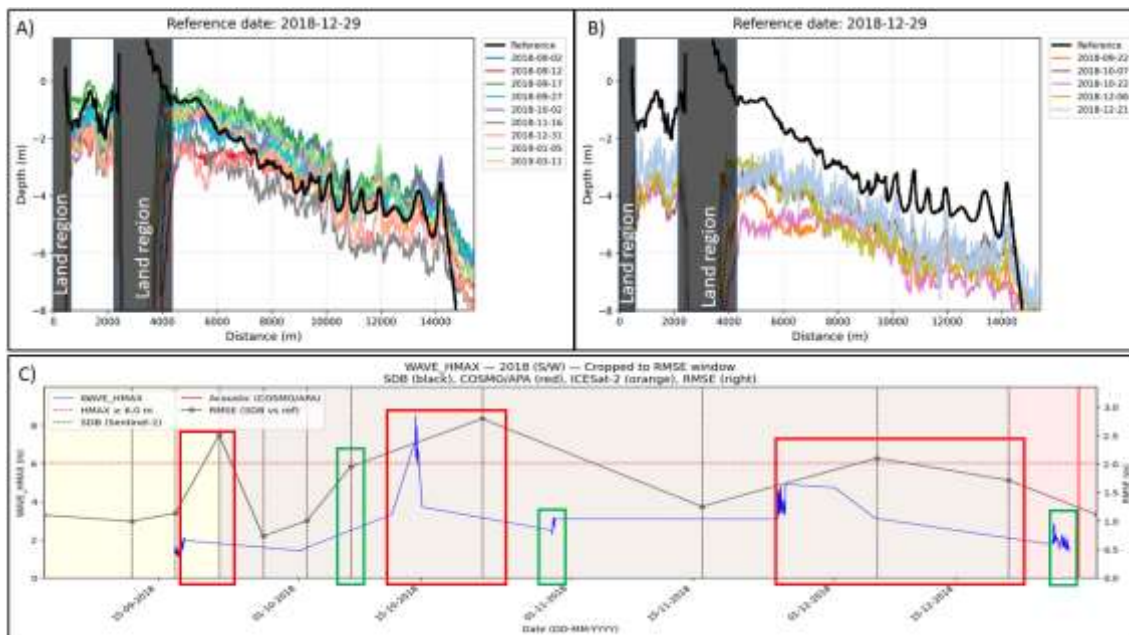


Figura 2. Perfis SDB versus perfil de referência de 2018-12-29 em função da agitação marítima. A) Perfis verticais em datas sem agitação marítima significativa. B) Perfis verticais em datas com agitação marítima significativa. C) Série temporal do RMSE (linha preta) e da altura máxima da onda (linha azul). Linhas tracejadas a preto indicam as datas das imagens e a linha vermelha a data da batimetria APA usada no cálculo. Retângulos vermelhos assinalam eventos de agitação marítima anteriores a RMSE elevado, e retângulos verdes correspondem a situações anómalas (agitação sem impacto no RMSE ou aumento de RMSE sem causa aparente).

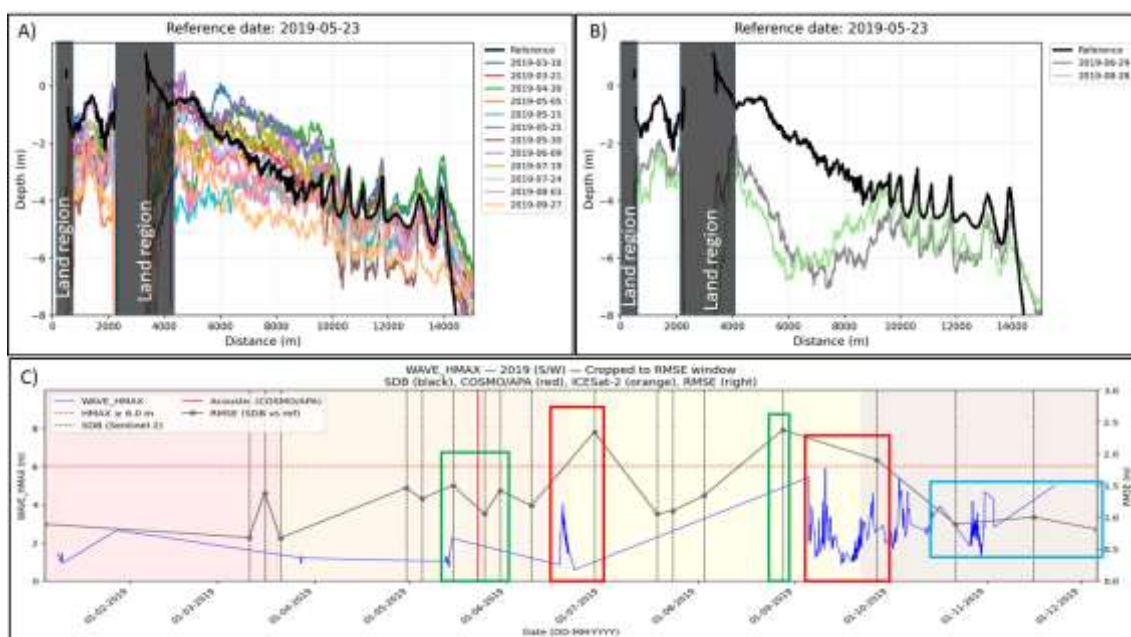


Figura 3. A) Perfis verticais referentes a datas sem registo de agitação marítima significativa. B) Perfis verticais para datas com ocorrência de agitação marítima significativa. C) Série



temporal do RMSE (linha preta) e da altura máxima da onda (linha azul). As linhas verticais tracejadas a preto assinalam as datas de aquisição das imagens Sentinel-2 e a linha vermelha a data da batimetria APA usada no cálculo do RMSE. Retângulos vermelhos indicam eventos de agitação marítima antes de valores elevados de RMSE; retângulos verdes representam situações anómalas; o retângulo azul assinala a mudança da referência batimétrica, sem impacto no RMSE.

Conclusão

Neste estudo, evidencia-se a capacidade de generalização temporal do modelo. O modelo apresenta resultados satisfatórios na maioria das condições ambientais, confirmando a sua robustez. Contudo, em determinadas situações, observam-se limitações, sobretudo associadas a períodos de forte agitação marítima. Nestes contextos, a dinâmica costeira pode alterar significativamente a morfologia do fundo marinho e promover a ressuspensão de sedimentos, o que aumenta a concentração de matéria em suspensão na coluna de água. Este fenómeno intensifica a atenuação da radiação e degrada a propagação da luz no meio aquático, comprometendo a qualidade das estimativas batimétricas.

Referências Bibliográficas

Santos, R., Quartau, R., Lamas, L., Cândido, R., & Pinto, J. P. (2025). "Application of Neural Networks for Bathymetric Estimation Using a short time-series of Sentinel-2. A Case Study: Setúbal-Troia, Portugal". *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101683.