



ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, EM PRAIA COM AMBIENTE DE MESOMARÉ, UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS

*Edico Ramon de Melo*¹

*Guilherme Antonio Gomes do Nascimento*²

RESUMO

Com objetivo de estimar a linha de costa (LC) para uma época de referência por meio do uso de imagens orbitais e dados de maré, o presente trabalho compara a aplicação de dois modelos: Regressão Linear (RL) e Projeção da Maré Observada (PMO). A avaliação dos resultados obtidos se baseou nas análises estatística e visual. Os resultados mostram um melhor desempenho do PMO em praia com ambiente de mesomaré.

Palavras-chave: linha de costa, ambiente de mesomaré, Sentinel, predição, maré.

ABSTRACT

In order to estimate the coastline (LC) for a reference time through the use of orbital images and tidal data, this study confronts two models: linear regression (RL) and tidal projection (PMO). The evaluation was based on statistical and visual analysis and indicated a better performance of PMO in a mesotidal beach environment.

¹ Oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha, Mestrando em Ciências Cartográficas na Universidade Estadual Paulista – UNESP. Email: edico.ramon@marinha.mil.br

² Oficial do Corpo da Armada, Mestre em Ciências Cartográficas pela Universidade Estadual Paulista – UNESP, servindo presentemente no Centro de Hidrografia da Marinha – CHM. Email: guilherme.nascimento@marinha.mil.br.

Keywords: shoreline, mesotidal environment, Sentinel, prediction, tidal

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui linhas de costa que somam 10.959 km de extensão, de acordo com o Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil (IBGE, 2011). Diversos autores divergem quando o objetivo é defini-la, sendo tal fato decorrente da complexidade dessa feição geográfica que, em alguns casos, pode variar dezenas de metros em um único dia, ou, em outros, apresentar pouca alteração por longos períodos.

De maneira geral, a análise da variação da linha de costa e da tendência da dinâmica geomorfológica costeira é fundamental para uma ampla gama de investigações realizadas por cientistas, engenheiros e gestores costeiros (BOAK; TURNER, 2005; ALTINUC; KeçELI; SEZGER, 2014). Dentre os desafios de cada um desses profissionais, está a devida seleção das fontes de dados, escala de tempo e modelos, de acordo com as características dos fenômenos a serem considerados nos estudos sobre a dinâmica da linha de costa (VOS *et al.*, 2019).

Isso se dá em especial nas regiões onde ocorre a mesomaré (variação de maré com amplitude de aproximadamente 3 metros). Nessas áreas, a depender da declividade do perfil de praia, é possível observar com maior intensidade os efeitos da maré astronômica na linha de costa. No Brasil, essa dinâmica ocorre principalmente na região equatorial (FRANCO, 2009; PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020).

Nesse contexto, estudar técnicas para análise da linha de costa que estejam associadas à dinâmica de maré é um desafio necessário para a definição dos limites entre terra e água.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é estimar a linha de costa para uma época de referência em ambiente de mesomaré, com o emprego de imagens ópticas orbitais e dados maregráficos com datas anteriores à data a ser estimada (predição).

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um método para extração de linha de costa a partir de medidas sobre imagens ópticas orbitais;
- Desenvolver um método de análise estatística e visual dos resultados; e
- Validar os métodos propostos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados se resumem em imagens orbitais multiespectrais, dados de altura de maré obtidos para a área de interesse, um microcomputador dotado do *software* QGIS 3.24, um interpretador para a linguagem de programação *Python* 3.9 e o ambiente de desenvolvimento *PyCharm* 2021.2.3 9 *Community Edition*, além de bibliotecas específicas para a aplicação desejada.



A área de interesse (AOI) se localiza em Fortaleza-CE e consiste na faixa de areia com extensão de 7,5 km, que se inicia ao sul, na foz do rio Cocó, e segue até um enrocamento na sua extremidade ao norte, no bairro Cais do Porto, como mostrado na Figura 1.

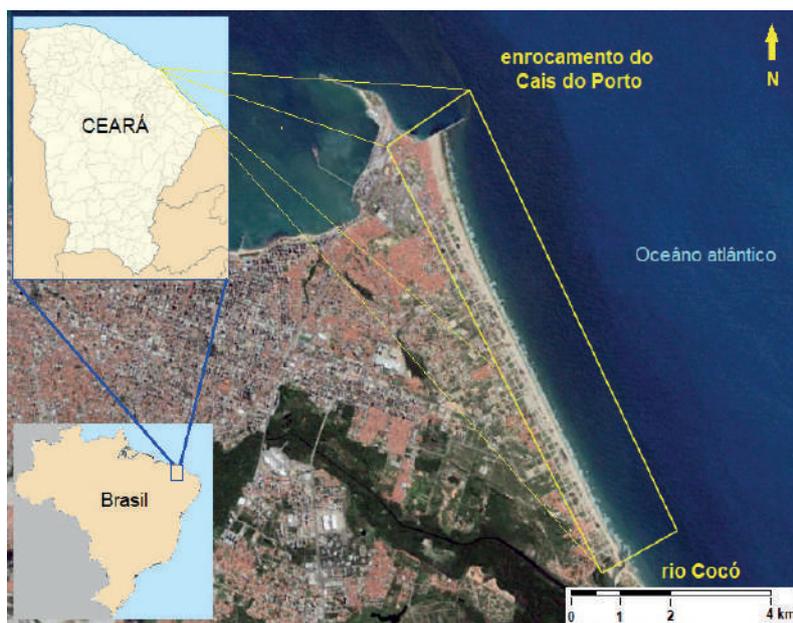


Figura 1 – Área de interesse - Fortaleza – CE. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A localização da AOI nas proximidades da linha do Equador (latitude de $03^{\circ} 45'$) confere uma das características de um ambiente de mesomaré (ALBUQUERQUE *et al.*, 2009) e possibilita a detecção dos efeitos da maré astronômica (FRANCO, 2009; PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020; VOS *et al.*, 2019) na linha de costa através de imagens orbitais.

A aquisição das imagens orbitais da plataforma Sentinel pode ser realizada utilizando o portal da internet *Copernicus Open Access Hub da European Space Agency* (ESA), disponível no link: <https://scihub.copernicus.eu/>. Entretanto, nesse estudo, a utilização das imagens se deu

no ambiente da plataforma *Google Earth Engine*, que pode ser configurado por meio do link: <https://code.earthengine.google.com/>.

As informações básicas utilizadas como entrada para requisição das imagens desejadas foram as datas de coleta, a coleção das Imagens (Sentinel-2) a área de interesse e as bandas espectrais (B3 – verde e B8 – infravermelho próximo).

As imagens orbitais utilizadas são provenientes do sensor *MultiSpectral Instrument* MSI, embarcado na plataforma Sentinel-2, da ESA (ESA, 2022). Essas imagens possuem resolução espacial de 10m, resolução temporal de 5 dias e resolução radiométrica de 12 bits.

A partir deste conjunto de 12 cenas, foram selecionadas as bandas espectrais 3 (verde) e 8 (infravermelho próximo) para a aplicação do índice espectral NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (DU Y *et al.*, 2016), para o realce do corpo d'água. O período de observação considerado foi de 75 dias, para que seja detectado apenas as variações de curto período, as datas e horários das imagens adquiridas estão listadas no Quadro 1. A cena mais recente (número 12) foi utilizada como referência para testar a capacidade dos modelos em prever a posição da linha de costa baseando-se em informações pregressas.

Quadro 1 – Data e hora exata da aquisição das imagens utilizadas

Época	Data	Hora - UTC
1	13/06/18	13:02:46
2	23/06/18	13:02:47
3	28/06/18	13:02:45
4	08/07/18	13:02:45
5	13/07/18	13:02:48
6	18/07/18	13:02:45
7	02/08/18	13:02:47
8	12/08/18	13:02:46
9	17/08/18	13:02:40
10	22/08/18	13:02:46
11	27/08/18	13:02:38
12(referência)	01/09/18	13:02:45

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Os dados de altura da maré foram adquiridos por meio da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que disponibiliza informações das estações maregráficas permanentes em intervalos de 5 min. A Figura 2 mostra a Estação maregráfica de Fortaleza (EMFOR), instalada no cais do porto de Mucuripe, Fortaleza-CE, suas coordenadas são $03^{\circ}42'52.55''S$ de latitude e $038^{\circ}28'36.54''O$ de longitude em SIRGAS 2000.

A partir das imagens obtidas, inicia-se a etapa de extração das distâncias das linhas de costa instantâneas (LCI). O processo tem início na seleção da AOI a partir da cena Sentinel-2 até a geração da tabela com as distâncias medidas das LCI a partir de uma linha de base (LB), ao longo dos transectos, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 2 – Estação EMFOR que pertence à RMPG do IBGE. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)



Figura 3 – Localização dos transectos utilizados. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

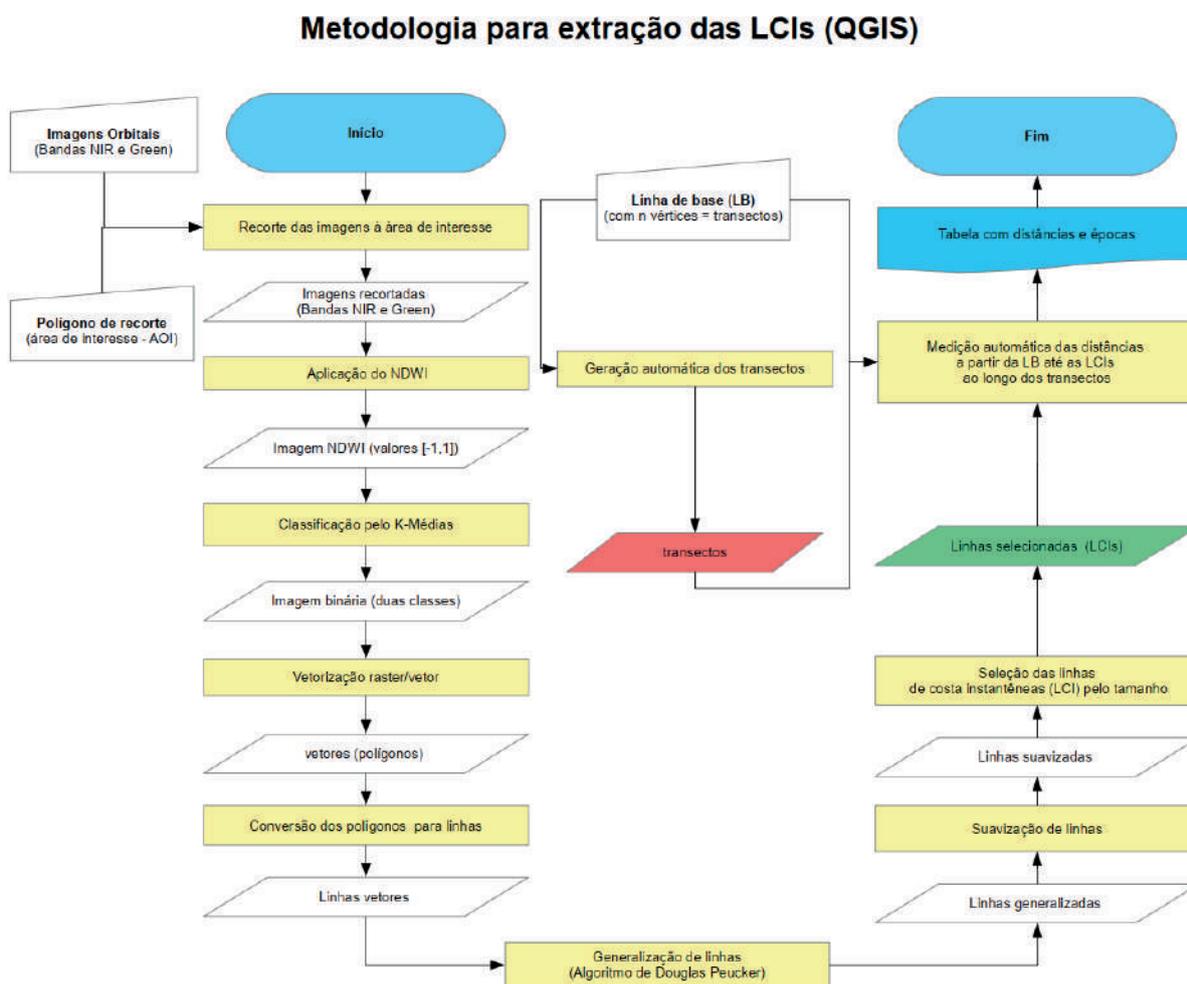


Figura 4 – Diagrama do processo de extração e medição das distâncias Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Para tanto, o método foi conduzido no *software* QGIS, com uma execução em 10 etapas, com cada etapa utilizando um *plug-in*, disponível em bibliotecas. A Figura 4 mostra as etapas na forma de um diagrama e as configurações utilizadas em cada etapa da extração

e medição das LCI estão resumidas no Quadro 2. Ao ser executado para todas as épocas, o produto final é um arquivo .csv, cuja primeira coluna é a data-hora, enquanto as demais elencam as distâncias medidas para cada época (linhas) ao longo de cada transecto.

Quadro 2 – Configurações utilizadas na etapa de extração das distâncias

Etapa	Descrição	Parâmetro / valor
1	Recorte das imagens à área de interesse	nenhum parâmetro
2	NDWI	nenhum parâmetro
3	Classificação por K-médias	número de classes = 2
4	Vetorização (raster/vetor)	nenhum parâmetro
5	Conversão de polígonos para linhas	nenhum parâmetro
6	Generalização de linhas	Douglas-Peucker; lim. = 10 m
7	Suavização de linhas	ângulo máximo = 80°
8	Seleção das LCIs	comp. $\geq 0,8 \cdot \text{comp. da LB}$
9	Geração automática dos transectos	tamanho dos transectos = 600 m
10	Medição das distâncias das LCIs à LB	nenhum parâmetro

O objetivo da previsão é estimar a LC para um instante em que se conhece sua verdadeira posição, denominada linha de referência (LR), com base na observação das LCI de épocas anteriores. Intuitivamente, quanto mais transectos, melhor será estimada tal linha de costa. Entretanto, alguns desafios como a presença de nuvens nas imagens ópticas orbitais limitam a quantidade de transectos que contenham as medições relativas a cada época. Nessa etapa, os dois modelos utilizados foram: regressão linear (RL) e projeção de maré observada (PMO).

3.1. Modelo de Regressão Linear (RL)

Na previsão da linha de costa por regressão linear, as variáveis dependentes são distâncias planas medidas ao longo de retas perpendiculares à LC, os transectos, que indicam a posição da linha de costa instantânea (LCI).

Essa distância plana $d(t)$, que representa a LCI no instante t , é medida a

partir de uma linha de base (LB) arbitrada (origem das distâncias). A variável independente é a própria época da observação t . Dessa forma, o modelo para a RL consta como o mostrado na Equação 1.

$$d(t) = at + b \quad (1)$$

onde:

$d(t)$: distância plana da LCI para um instante

t : instante da observação da LCI

a : coeficiente angular

b : coeficiente linear

Portanto, a regressão tem função de preditora quando a época da linha de referência LR é subsequente às épocas das LCI utilizadas para determinar os coeficientes a e b da Equação 1. Nesse modelo, quando são observadas mais de três LCI, o número de distâncias medidas $d(t)$ supera o número de coeficientes, o que torna possível estimar os coeficientes pelo do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) (GONCALVES *et al.*, 2012).



3.2. Modelo de Projeção da Maré Observada (PMO)

O modelo de projeção da maré observada (PMO) se baseia na correlação entre a altura da maré local e a distância planimétrica à LC observada nas imagens orbitais, em áreas onde a declividade $\tan\beta$ do perfil de praia permite tais observações. (VOS *et al.*, 2019). Apesar de ser possível estimar um valor que represente toda a região analisada como apresentado em VOS e colaboradores (2020), para cada perfil de praia existe um valor de declividade distinto, como ilustrado na Figura 5.

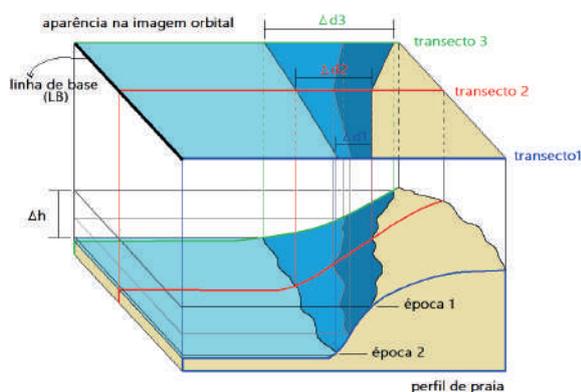


Figura 5 – Influência da declividade na distância horizontal em função da altura de maré. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A partir da Figura 5, pode-se observar que, para cada transecto, uma mesma variação de altura da maré Δh corresponde a diferentes medidas de distância plana Δd . Isso se dá em função da diferença de declividade $\tan\beta$. Esta relação geométrica é dada pela Equação 2.

$$\tan\beta = \frac{\Delta h}{\Delta d} \quad (2)$$

Para duas épocas distintas ($N=2$) é possível estimar a declividade do perfil de praia ao longo de um mesmo transecto. Já para períodos em que $N > 2$, tem-se a ocorrência de redundâncias. A estimativa de $\tan\beta$ pode ser então obtida a partir da raiz quadrada do quadrado dos valores médios de Δh e Δd , como o expresso na Equação 3.

$$\tan\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta h_i^2}{\sum_{i=1}^N \Delta d_i^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h(t_i) - \bar{h})^2}{\sum_{i=1}^N (d(t_i) - \bar{d})^2}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h(t_i) - \bar{h})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d(t_i) - \bar{d})^2}} = \frac{\sigma h}{\sigma d} \quad (3)$$

Por fim, conhecendo a declividade $\tan\beta$, é possível projetar a maré observada para estimar a posição da linha de referência LR em cada transecto, no instante t . Para tal, torna-se necessário somente conhecer a altura de maré em t . A Equação 4 demonstra a expressão da PMO.

$$d(t) = \frac{h(t) - \bar{h}}{\tan\beta} + \bar{d} \quad (4)$$

em que:

$d(t)$: distância plana da LCI para um instante t

$h(t)$: altura da maré observada para um instante t

$\tan\beta$: declividade do perfil de praia ao longo de um transecto

\bar{h} : média das alturas de maré observadas

\bar{d} : média das distâncias planas das LCI observadas

3.3. Análise dos erros

As estatísticas foram calculadas a partir do erro de previsão da última época

utilizada (2018-09-01), conforme mostrado na Equação 5. Os dados das demais 11 épocas foram utilizados para realizar os cálculos necessários à estimação das distâncias para a LRE a partir de cada modelo.

$$\mathbf{Erro}_{modelo} = \mathbf{d}'_{LRE-modelo} - \mathbf{d}_{LR} \quad (5)$$

em que:

\mathbf{Erro}_{modelo} : vetor de erros calculado para cada modelo

$\mathbf{d}'_{LRE-modelo}$: vetor das distâncias planas estimadas por cada modelo

\mathbf{d}_{LR} : vetor das distâncias planas observadas para a LR

Também foram analisados o gráfico e o histograma dos erros de previsão para cada transecto, com base na média,

desvio-padrão e na curva da função de densidade de probabilidade (f.d.p.) normal.

Além disso, foram selecionados três outros estimadores amplamente utilizados em estudos desse campo de pesquisas para avaliar o desempenho de cada algoritmo, sendo eles: raiz quadrada do erro médio quadrático RMSE (*Root Mean Square Error*); coeficiente de correlação (CC); e percentual médio do erro absoluto MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). Para finalizar, a partir das distâncias, foram construídas as linhas de referência estimadas LRE por cada modelo. Essas linhas foram então comparadas à LR extraída da imagem, sobre uma composição colorida de imagens orbitais da época de referência, possibilitando a análise visual.

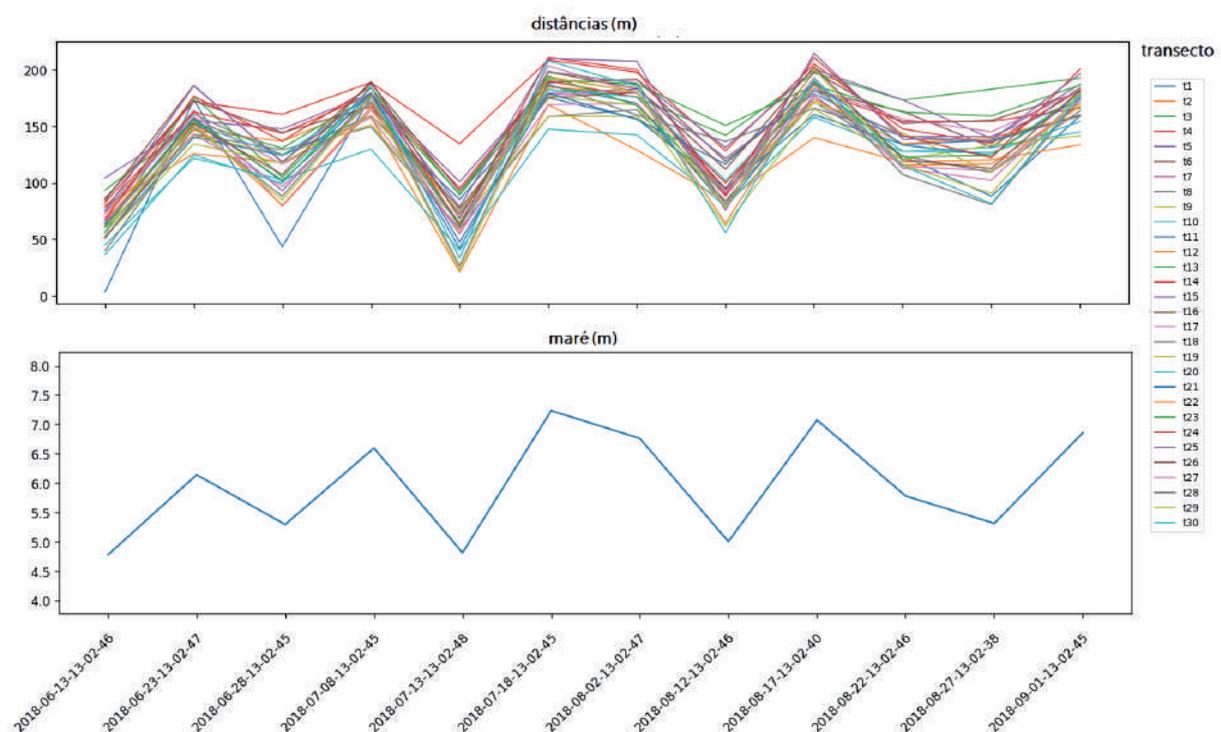


Figura 6 – Distâncias medidas em forma gráfica e altura de maré observada. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)



4. RESULTADOS

4.1. Análise dos dados de entrada

A Figura 5 mostra na parte superior, as distâncias medidas, onde, no eixo das abscissas, são mostradas as épocas e, no eixo das ordenadas, é mostrado o valor medido em metros. Nesse gráfico, cada linha refere-se a uma amostra da LC (transecto). Na mesma figura, logo abaixo, é mostrado o gráfico da maré observada para as mesmas épocas (dentro do período de 75 dias observados).

A partir da Figura 6, é possível afirmar que a variação horizontal da linha de costa ao longo dos transectos é coerente com a variação vertical da maré local.

4.2. Análise dos resultados

A análise dos resultados foi conduzida por avaliação estatística dos erros e por verificação visual. A primeira teve como base o gráfico dos erros; o histograma dos erros das amostras; a função de densidade de probabilidade normal; os valores de média, desvio-padrão e as estatísticas RMSE, CC e de MAPE. Por fim, foi feita a análise visual da LC prevista para a

época de referência (2018-09-01) para os modelos RL e PMO.

O gráfico mostrado na Figura 7 contém o comportamento dos erros na estimação da linha de referência LR em metros (eixo das ordenadas) para cada amostra (eixo das abscissas). As linhas pretas pontilhadas indicam o intervalo de ± 20 m, o qual equivale a dois pixels na imagem orbital e equivale ao erro máximo da incerteza horizontal para linha de costa estipulado pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Observa-se que os modelos apresentaram tendências não maiores do que dois pixels nas imagens orbitais.

A Figura 8 mostra os histogramas dos erros. Destaca-se o modelo PMO como o mais acurado, pois teve os erros mais concentrados e aderentes à curva da f.d.p. normal.

O Quadro 3 mostra os valores calculados para as estatísticas dos erros, quais sejam: média μ , desvio-padrão σ , raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de correlação (CC) e percentual do erro médio absoluto (MAPE). Vale ressaltar que, enquanto o valor de CC, mostra o percentual de acerto, o MAPE mostra o percentual de erro médio absoluto. Portanto, quanto menor o valor de MAPE, melhor.

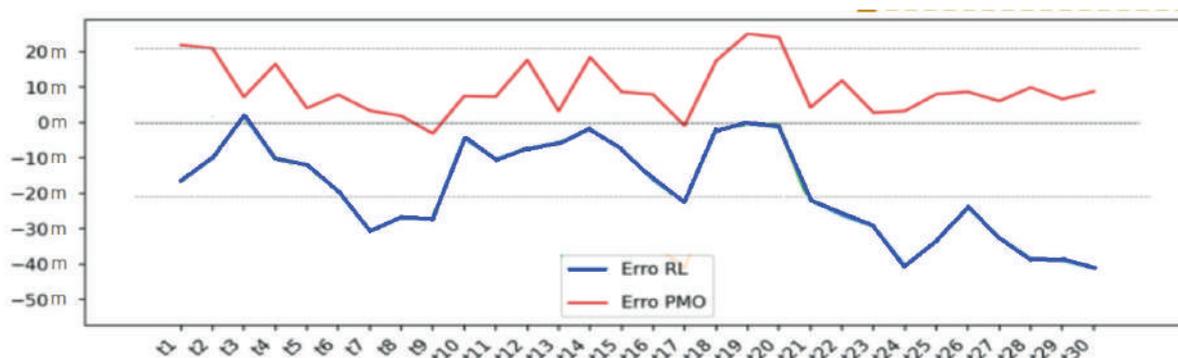


Figura 7 – Gráfico dos erros Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

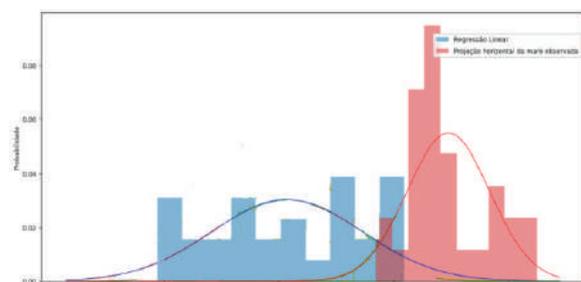


Figura 8 – Histograma dos erros. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Quadro 3 – Valores das estatísticas.

Estatística	Modelo RL	Modelo PMO
Média μ	16,5 m	15,19 m
Desvio-padrão σ	18,5 m	13,71 m
Raíz quadrada do erro médio quadrático RMSE	22,75 m	11,97 m
Coefficiente de correlação CC	63%	89%
Percentual do erro médio absoluto MAPE	11%	6%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

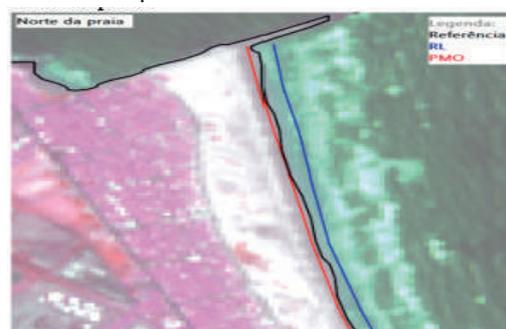
A análise do Quadro 3 destaca o modelo PMO como o mais acurado, com RMSE de valores próximos à metade daqueles do modelo de regressão linear.

Ademais o resultado alcançado com o modelo PMO tem acurácia compatível com o encontrado por Vos, 2019. Neste artigo foram analisadas as variações da linha de costa em 5 praias em diferentes escalas de tempo, para as quais o autor obteve um RMSE entre 7,3 m e 12,7 m, utilizando os produtos Sentinel e Landsat e um modelo otimizado de classificação de imagens baseado em redes neurais.

4.3. Análise visual das linhas de referência estimadas

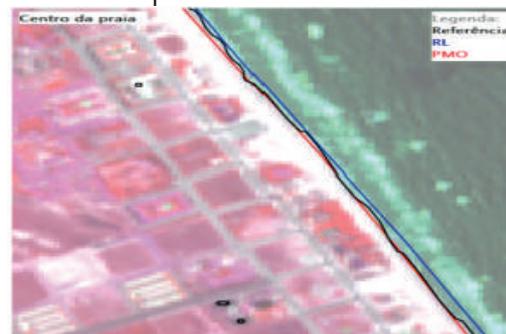
A Figura 9 apresenta três trechos da faixa de areia da AOI (norte, centro e sul).

Norte da praia



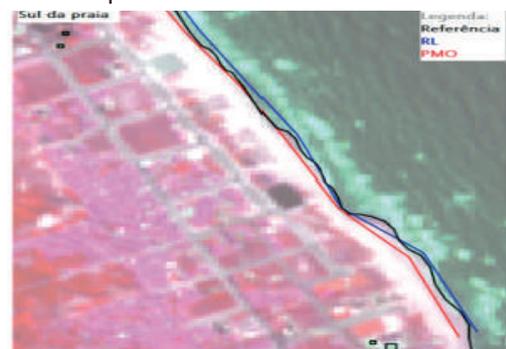
(a)

Centro da praia



(b)

Sul da praia



(c)

Figura 9 – Comparação das LC estimadas com a referência. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)



Nesta figura, a imagem exibida ao fundo é a composição colorida falsa-cor do sensor MSI Sentinel-2 (bandas infravermelho, verde e azul, IRGB). A análise visual das linhas de referência estimadas (LRE) ou previstas confirma o resultado observado estatisticamente, a LRE prevista pelo modelo PMO (linha vermelha) foi a que mais se aproximou da LR (linha preta).

5. CONCLUSÕES

Com base na análise dos dados de entrada e após a realização dos experimentos, foi possível inferir que a metodologia para a extração da LC com emprego de ferramentas do *software* QGIS foi suficiente para extrair as LCI. O efeito visual da amplitude da maré pode não ser uniforme

para uma mesma faixa de areia, pois depende da declividade do perfil de praia, o que fez da determinação dessa declividade, um ponto importante do estudo.

Para a análise gráfica e de histograma, aferições estatísticas e análise visual, o modelo PMO se mostrou o mais adequado à estimação a linha de costa para uma época arbitrária, em ambiente de mesomaré, a partir do uso de imagens orbitais, com RMSE compatível com resultados de trabalhos publicados a nível internacional.

Portanto, foram alcançados nesse trabalho, os objetivos específicos de desenvolvimento, teste e análise de diferentes modelos para estimação da posição da LC, para situações onde a variação horizontal da maré é detectável em imagens orbitais.

6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Miguel da Guia Albuquerque; CALLIARI, Lauro Júlio; CORRÊA, Iran Carlos Stallivieri; PINHEIRO, Lidriana de Souza. *Morphodynamic of Futuro Beach, Fortaleza-CE: a synthesis of two years of study. Quaternary and Environmental Geosciences*, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 49-57, 2009.

ALTINUC, S. O.; KECELI, A. S.; SEZER, E. A. *Semi-automated shoreline extraction in satellite imagery and usage of fractals as performance evaluator. International Journal of Computer Theory and Engineering*, v. 6, p. 102–106, 2014.

BOAK, E. e TURNER, I. *Shoreline definition and detection: A review. Journal of Coastal Research Journal of Coastal Research*, v. 21, p. 688–703, 2005.

DU Y., ZHANG Y., LING F., WANG Q., LI W., LI X. *Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. Remote Sensing*. v. 8(4), n. 354, 2016.

ESA, E. S. A. “*MultiSpectral Instrument (MSI)*”. disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

FRANCO, A. S. Marés: Fundamentos, Análise e Previsão. 2. ed. Niterói: DHN, 2009

GONCALVES, R. M.; AWANGE, J. L.; KRUEGER, C. P.; HECK, B.; COELHO, L. dos S. A *comparison between three short-term shoreline prediction models. Ocean and Coastal Management*, v. 69, p. 102–110, 2012. ISSN 0964-5691. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569112001937>>.

IBGE. Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. [S.l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2011. ISBN 978-85-240-4219-5.

PEREIRA, L.; CONCEJO, A. V.; TRINDADE, W. 5 - *tidal modulation*. In: JACKSON, D. W.; SHORT, A. D. (Ed.). *Sandy Beach Morphodynamics. Elsevier*, 2020. p. 87–101. ISBN 978-0-08-102927-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081029275000059>>.

VOS, K.; HARLEY, M. D.; SPLINTER, K. D.; SIMMONS, J. A.; TURNER, I. L. *Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. Coastal Engineering*, v. 150, p. 160–174, 2019. ISSN 0378-3839. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383918305313>>.

VOS, K.; HARLEY, M. D.; SPLINTER, K. D.; WALKER, A.; TURNER, I. L. *Beach slopes from satellite-derived shorelines. Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 14, p. e2020GL088365, 2020. E2020GL088365 2020GL088365. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL088365>>.

