

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 22/01/2026.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus Presidente Prudente

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

EDICO RAMON DE MELO

**ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, COM USO DE IMAGENS
ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS, PARA
PRODUÇÃO/ATUALIZAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS
NÁUTICOS**

PRESIDENTE PRUDENTE

2024

EDICO RAMON DE MELO

**ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, COM USO DE IMAGENS
ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS, PARA
PRODUÇÃO/ATUALIZAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS
NÁUTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Cartográfica, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.
Orientador: Prof. Dr. Mauricio Galo

PRESIDENTE PRUDENTE

2024

M528e

Melo, Edico Ramon de

Estimação da linha de costa, com uso de imagens orbitais e dados maregráficos, para produção/atualização de produtos cartográficos náuticos / Edico Ramon de Melo. -- Presidente Prudente, 2024

71 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Mauricio Galo

1. Extração de linha de costa. 2. Modelo de estimação de linha de costa. 3. Análise de curto prazo. I. Título.

Impacto¹ Esperado Desta Pesquisa

Esta dissertação de mestrado propõe um método para estimar a linha de costa (LC) associada ao nível médio das preamares de sizígia (MHWS) e atualizar cartas náuticas. O método usa imagens ópticas orbitais e dados de marés, permitindo a estimativa das LC em regiões com grande amplitude de maré e praias de baixa declividade, em análises de curto prazo.

Potential Impact of This Research

This master's thesis proposes a method for estimating the coastline associated with Mean High Water Springs (MHWS) to update nautical charts. The method utilizes orbital optical images and tide data to estimate the coastline in regions with high tidal range and low-gradient beaches through short-term analysis.

¹Informação inserida de acordo com a Portaria nº 117, de 21 de dezembro de 2022, da Unesp.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

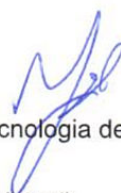
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, COM USO DE IMAGENS ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS, PARA PRODUÇÃO/ATUALIZAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS NÁUTICOS

AUTOR: EDICO RAMON DE MELO

ORIENTADOR: MAURICIO GALO

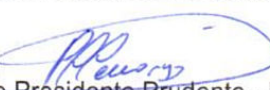
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Cartográficas, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAURICIO GALO (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "M. Galo", is placed over the text of the first professor's name and affiliation.

Prof. Dr. RODRIGO MIKOSZ GONÇALVES (Participação Virtual)
Departamento Engenharia Cartográfica e de Agrimensura / Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "P. Camargo", is placed over the text of the third professor's name and affiliation.

Presidente Prudente, 22 de janeiro de 2024

À minha mãe Rita.

Agradecimentos

À Marinha do Brasil, em especial ao CC Nascimento e CF Peçanha, pelo apoio e incentivo ao pleito e pelo apoio financeiro e logístico sem o qual não seria possível este trabalho.

Ao professor Dr. Mauricio Galo, cuja admiração nasceu na graduação e já ultrapassou uma dezena de anos, com paciência e dedicação me orientou fazendo sugestões de grande importância que culminou neste texto final.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves e Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo, com sugestões dadas no Exame de Qualificação que mudaram minha forma de enxergar os problemas aqui discutidos.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Unesp, em especial, ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e aos professores Dr. Aluir Porfirio Dal Poz e Dr. Daniel Arana (UFPR) por suas preciosas contribuições nos estudos dirigidos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos amigos do PPGCC em especial ao doutorando Vinícius, que com sua amizade deixou minha estadia em Presidente Prudente mais leve e interessante.

Aos amigos de longa data Adilson, Karina e Kelly que residem em Presidente Prudente há anos e puderam me ajudar seja com longas conversas sobre assuntos aleatórios, visitas, partidas de vôlei amador e passeios. Também, aos amigos que fiz na cidade: Mayara, Isabela, Alexandre, Jacqueline, Flávia e mais uma dúzia que não citarei mas estão na minha lembrança.

À minha família em especial ao meu pai Erivaldo, meus irmãos Uilams e Deise (grávida de Irís), meu sobrinho Igor, e à minha mãe Rita a quem dedico este trabalho, pois só ela sabe o que já passamos nessa vida e fica cada vez mais claro a importância das decisões que ela tomou por minha causa.

*"A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado. A
imaginação envolve o mundo."*

Albert Einstein

Resumo

O Brasil possui linhas de costa que somam 10.959 km de extensão. A DHN é o serviço hidrográfico nacional responsável por analisar e representar a linha de costa (LC) nas cartas náuticas brasileiras. Esta LC é um fenômeno dinâmico cujo estudo é do interesse de diversos profissionais do ramo das ciências da Terra, sendo a representação desta LC nas cartas náuticas brasileiras, referida ao indicativo vertical *Mean High Water Springs* (MHWS). O modelo para estimação da linha de preamar de sizígia (LPS), relacionada com o MHWS, se baseia na relação geométrica entre a altura da maré local e sua projeção horizontal vista do espaço e registrada em imagens de satélites, aqui denominado modelo de Projeção de Maré (PM). Assim, implementou-se a técnica para a extração das linhas de costa instantâneas (LCI) que é executada a partir do *software* QGIS. Além disso, desenvolveu-se o ANALICOS (ANÁLise de LInha de COsta), um *script* destinado à preparação dos dados, estimação e análise estatística, a linguagem de programação utilizada foi *Python*. A partir dos dados de entrada, foi possível verificar a coerência geométrica entre as distâncias horizontais medidas nas imagens Sentinel-2 com a altura de maré local. Foram, utilizadas duas linhas de referência: a marca deixada pela água em uma imagem Sentinel tomada no período da maré de sizígia e a linha de costa publicada pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) referida à linha de preamar média. Como resultado, a LPS estimada pelo modelo PM se aproximou mais da linha de referência extraída da imagem Sentinel. O produto foi validado para uso em cartas náuticas com escala a partir de 1:25.000 (Classe D), através de uma análise pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC-PCD) brasileiro vigente e analisado quanto aos critérios da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) cujo valor máximo tolerável para a incerteza horizontal para levantamento da linha de costa natural é de 20m a 95% de nível de confiança.

Palavras-chave: Extração de linha de costa, Modelo de estimação de linha de costa, Análise de curto prazo.

Abstract

Brazil has coastlines that are 10,959 km long. DHN is the national hydrographic service responsible for analyzing and representing the coastline (LC) in Brazilian nautical charts. This LC is a dynamic phenomenon whose study is of interest to several professionals in the field of Earth sciences, and the representation of this LC in Brazilian nautical charts is referred to the vertical indicative *Mean High Water Springs* (MHWS). The model for estimating the High Water Springs Line (LPS), related to MHWS, is based on the geometric relationship between the local tide height and its horizontal projection seen from space and recorded in satellite images, here called Tidal Projection (PM) model. Thus, we implemented the technique for the extraction of instantaneous coastlines (LCI) that is executed from QGIS *software* and developed the ANALICOS (coast line analysis), a *script* designed for data preparation, estimation and statistical analysis, implemented by the author in the *Python* programming language. From the input data, it was possible to verify the geometric coherence between the horizontal distances measured in the Sentinel-2 images with the local tidal height. Two reference lines were used: the mark left by the water in a Sentinel image taken in the period of the sizigy tide and the coastline published by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) referred to the average high water line. As a result, the LPS estimated by the PM model was closer to the reference line extracted from the Sentinel image. Finally, the product was validated for use in nautical charts with scale from 1:25,000 (Class D), through an analysis by the Brazilian Cartographic Accuracy Standard (PEC-PCD) and analyzed under the criteria of the International Hydrographic Organization (IHO).

Keywords: Shoreline extraction, Coast line estimation model, Short-term analysis.

Lista de figuras

Figura 1 – Trecho da carta náutica brasileira nº 1.	17
Figura 2 – Taxa de mudança da linha de costa a nível global em metros por ano, A dimensão do tamanho do círculo no mapa indica a intensidade da mudança e as cores verde e vermelho indicam acreção e erosão, respectivamente.	21
Figura 3 – Escala de tempo de alguns fenômenos observáveis na linha de costa.	22
Figura 4 – Distribuição da amplitude de maré em algumas regiões do mundo nas últimas décadas e aspecto dos gráficos da altura de maré em alguns locais para um mês de outubro qualquer. (A) Baía de <i>Fundy</i> no Canadá, (B) Enseada <i>Cook</i> nos EUA, (C) Baía <i>Bristol</i> na Inglaterra, (D) Baía <i>Mont-St-Michel</i> na França, (E) São Luís no Brasil, (F) Santa Cruz na Patagônia, (G) Mar Amarelo na China, e (H) <i>Derby</i> na Austrália.	23
Figura 5 – Perfil de praia, mostrando a nomenclatura geomorfológica.	24
Figura 6 – Ilustração das LCI para três épocas, vistas a partir do zênite.	25
Figura 7 – Ilustração vista em perfil do indicativo vertical associado à linha de costa.	25
Figura 8 – Levantamento fotogramétrico coordenado com o regime de maré.	27
Figura 9 – Exemplo do recorte de imagem orbital limitado à AOI em uma região costeira. Trata-se de uma composição falsa-cor de imagens do sensor MSI Sentinel-2.	28
Figura 10 – Processo de extração, generalização e suavização das LCI.	30
Figura 11 – Ilustração das LCI para três épocas com transectos e LB no mar.	31
Figura 12 – Ilustração da medição de três distâncias planas para LCIs observadas em três épocas.	31
Figura 13 – Geometria da força geradora de marés.	32
Figura 14 – Influência da força de tração e da força centrífuga sobre as massas d'água terrestres.	33
Figura 15 – Dinâmica luni-solar.	35
Figura 16 – Geometria da relação entre a altura da maré (vertical) e distâncias planas.	37
Figura 17 – Área de interesse - Praia do Futuro, Fortaleza - CE.	39
Figura 18 – Trecho da tábua de marés de Agosto de 2018, em que é destacado o horário e a altura da última preamar antes da tomada da imagem no dia 27.	41
Figura 19 – Imagem de referência tomada em 27/08/2018.	42
Figura 20 – Estação EMFOR que pertence à RMFG do IBGE.	44
Figura 21 – Alturas de maré registradas no dia 27/08/2018 e suas preamares, para a estação EMFOR.	44
Figura 22 – Linha de costa do litoral do Brasil disponibilizada pelo NOAA, publicada em 2017.	45
Figura 23 – Diagrama do método utilizado para extração das LCIs a partir de imagens orbitais.	47
Figura 24 – Início do arquivo .csv gerado no fim da etapa de medição das distâncias.	48
Figura 25 – Diagrama do método utilizado para a estimativa da LPS.	50

Figura 26 – Ilustração da relação geométrica entre a distância horizontal e a altura de maré por transecto.	51
Figura 27 – Disposição dos transectos arbitrados na Praia do Futuro, Fortaleza-CE.	55
Figura 28 – Ilustração dos produtos intermediários da etapa de extração das distâncias nas imagens orbitais, realizado no QGIS.	56
Figura 29 – Representação das distâncias medidas em cores quentes (valor alto) e frias (valor baixo).	57
Figura 30 – Distâncias medidas representadas em forma gráfica (a) e altura de maré observada no instante de cada imagem (b).	58
Figura 31 – Representação da correlação das amostras, positiva (vermelha) e negativa (azul).	59
Figura 32 – Gráfico das declividades (ordenadas) em percentual por transecto (abscissas).	60
Figura 33 – Gráfico dos erros na estimativa da LPS para cada transecto, em azul consideram-se os erros em relação à LPS visível em uma imagem do Sentinel e em laranja consideram-se os erros em relação à linha de costa da NOAA.	61
Figura 34 – Histograma dos erros em relação às duas referências.	62
Figura 35 – Comparação visual entre a LPS estimada e as duas linhas de referência.	63
Figura 36 – Trecho do Quadro 1 da ET-ADGV.	65

Lista de quadros

Quadro 1 – Variações horárias de elementos astronômicos notáveis.	34
Quadro 2 – Principais constituintes harmônicas puramente astronômicas.	35
Quadro 3 – Bandas espectrais MSI <i>Sentinel-2</i>	40
Quadro 4 – Data e hora exata da aquisição das imagens do Sentinel-2 utilizadas. . . .	41
Quadro 5 – Data e hora das observações de maré.	43
Quadro 6 – Configurações/Parâmetros utilizados na etapa de extração das distâncias. .	48
Quadro 7 – Elementos de entrada e saída do modelo PM.	53

Lista de abreviaturas e siglas

ANALICOS	ANÁLise de Linha de COSta (<i>script</i>)
AOI	<i>Area Of Interest</i>
CBERS	<i>China–Brazil Earth Resources Satellite program</i>
CC	Coeficiente de Correlação
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
EMFOR	Sigla da estação maregráfica de Fortaleza-CE
ESA	<i>European Space Agency</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSHHG	<i>Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
LB	Linha de base
LCI	Linha de costa instantânea
LC	Linha de costa
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LP	Linha de preamar
LPS	Linha de preamar de sizígia
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
MHW	<i>Mean High Water</i>
MHWS	<i>Mean High Water Springs</i>
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i>

MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MNDWI	<i>Modified Normalized Difference Water Index</i>
MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
NIR	<i>Near InfraRed</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OHI	Organização Hidrográfica Internacional
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
PM	Projeção de Maré
PPGCC	Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
RMPG	Rede Maregráfica Permanente para Geodésia
RMSE	<i>Root Main Square Error</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
SWIR	<i>Short Wave InfraRed</i>
THU	<i>Total Horizontal Uncertainty</i>
WVS	<i>World Vector Shorelines</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Contextualização do problema	18
1.3	Objetivos	19
1.4	Potenciais contribuições científicas	19
2	FUNDAMENTAÇÃO	20
2.1	Características e mudanças da linha de costa	20
2.1.1	Fenômenos que afetam a LC e suas escalas de tempo	20
2.1.2	Amplitude de maré	22
2.1.3	Geomorfologia costeira	24
2.1.4	Indicativo vertical baseado no MHWS	24
2.2	Extração e medição da linha de costa	26
2.2.1	Fontes de informações para levantamentos da linha de costa instantânea	26
2.2.2	Extração da linha de costa instantânea em imagens orbitais	27
2.2.3	Medição da linha de costa instantânea ao longo do tempo	30
2.3	Fundamentos para o modelo de estimação da linha de preamar	32
2.3.1	Marés	32
2.3.2	Declividade do perfil de praia	36
3	MATERIAL	38
3.1	Área de Interesse	38
3.2	Imagens Orbitais	39
3.2.1	Critério para escolha da fonte da informação	39
3.2.2	Critério para escolha do período	40
3.2.3	Critério para escolha da imagem para extrair uma das linha de referência	40
3.3	Dados de maré	43
3.3.1	Alturas de maré utilizadas no cálculo da declividade	43
3.3.2	Altura de maré da Linha de Preamar de Sizígia	44
3.4	Linha de costa da NOAA utilizada como referência	45
4	MÉTODO	46
4.1	Extração e medição das linhas de costa instantâneas em imagens orbitais	46
4.2	Estimação da linha de preamar de sizígia (LPS)	49
4.2.1	Estimação pela projeção da maré (PM)	51

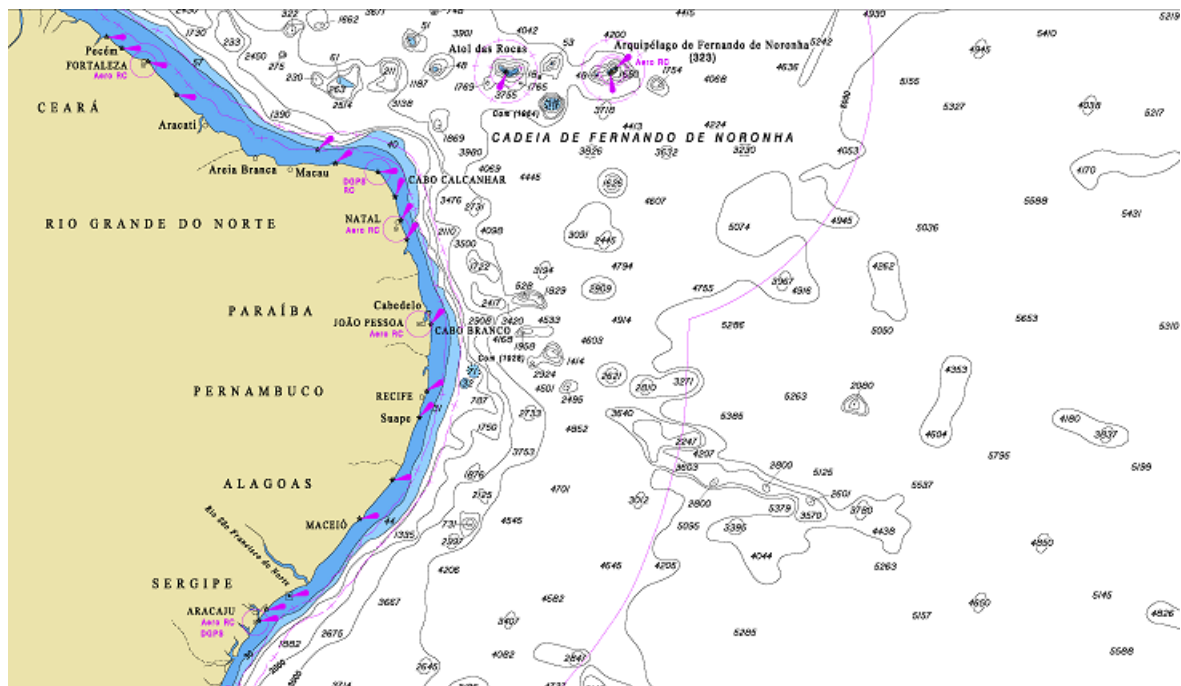
4.3	Análise dos resultados	53
4.3.1	Análise dos erros	53
4.3.2	Análise visual	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Análise das medições	57
5.2	Análise das declividades	59
5.3	Análise gráfica e estatística dos erros	60
5.4	Análise visual	63
5.5	Validação do produto para cartografia náutica	64
5.6	Síntese dos resultados e análise crítica	65
6	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS	69

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

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). A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) representa o serviço hidrográfico nacional e possui como organização militar técnica o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) que tem como missão a análise, armazenamento e intercâmbio de dados geoespaciais marinhos, entre estes, todas as cartas náuticas brasileiras. A Figura 1 mostra o trecho de uma carta náutica nacional.

Figura 1 – Trecho da carta náutica brasileira nº 1.



Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2017.

Neste contexto, a linha de costa é um dos elementos da carta náutica que representa o limite entre a terra e a água na época de sua produção/atualização.

De maneira geral, a análise da variação da linha de costa e 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; SEZER, 2014).

Entretanto, o desafio de cada profissional é selecionar as fontes de dados, escala de tempo e modelos, de acordo com as características dos fenômenos que se deseja observar na linha de costa (VOS et al., 2019).

Estes fenômenos podem ser classificados de acordo com a escala de tempo em que ocorrem, sendo os de curto e médio prazo associados com meteorologia, acreção e erosão de sedimentos; e os de longo prazo associados com o aumento do nível do mar (SCARDINO et al., 2020), por exemplo.

1.2 Contextualização do problema

A Organização Hidrográfica Internacional (OHI) define os padrões para os levantamentos hidrográficos, incluindo a linha de costa (OHI, 2020). Apesar de suas normas não especificarem um *datum* vertical utilizado como referência a nível global, nas cartas náuticas brasileiras, a linha de costa está associada ao nível médio da maré de preamar de sizígia¹, referida ao indicativo vertical *Mean High Water Springs* (MHWS) (DHN, 2022). Estas referências verticais estão associadas ao estudo da dinâmica de maré oceânica (FRANCO, 2009), cujas características são próprias de cada região costeira, como discutido brevemente no Capítulo 2.

Como especificado pela OHI, os valores de incerteza total horizontal (THU - *Total Horizontal Uncertainty*) aceitáveis para levantamentos da linha de costa estão entre 20 a 2 m, ao nível de 95% de confiança. Isto varia em função do rigor almejado para o levantamento, de acordo com sua finalidade (OHI, 2020). De maneira geral, essas regulamentações estabelecem critérios mais rigorosos para as construções costeiras próximas à linha do litoral, quando comparadas aos elementos naturais que a compõem.

Nas regiões em que há grande amplitude de maré² e baixa declividade do perfil de praia, é possível observar com maior intensidade a variação horizontal da linha de costa relacionada com a maré astronômica, originada de acordo com os movimentos astronômicos entre o sistema Terra-Lua-Sol, sendo que no Brasil ela se manifesta de forma mais intensa na região equatorial (FRANCO, 2009).

Contanto, por estas características, pode-se inferir que seria suficiente utilizar como indicativo (*proxy*) da MHWS a linha de preamar de sizígia (LPS) visível em uma imagem de satélite tomada no instante de maior altura da maré. Porém, raramente isto ocorre, uma vez que as imagens ópticas costumam ser tomadas nos instantes programados pelo sistema, que geralmente correspondem aos horários em que há maior incidência de luz solar, devido às suas características de sensores passivos, e não coordenado com o regime de maré local.

¹ Maior altura da maré semidiurna de maior amplitude em uma semilunação, ocorre aproximadamente a cada 15 dias (FRANCO, 2009).

² Em Pereira, Concejo e Trindade (2020) é denominada meso, macro ou hiper maré de acordo com o valor da amplitude em metros. Por outro lado, a baixa amplitude é denominada micro-maré.

Neste contexto, a análise da linha de costa por meio de imagens orbitais e sua associação com referenciais verticais apresentam-se como um desafio significativo. Essa abordagem é essencial para delimitar com precisão os limites entre a terra e a água nas cartas náuticas.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma estimativa da linha de costa e avaliar sua viabilidade para a produção e atualização de cartas náuticas, definindo um indicador associado ao nível médio de preamar de sizígia (MHWS). Para alcançar esse objetivo, propõe-se a utilização de imagens ópticas orbitais e dados maregráficos em regiões com grande amplitude de maré e perfil de praia com pequena declividade. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver e implementar um método para extração de linha de costa instantânea (LCI) a partir de medidas feitas sobre imagens ópticas orbitais;
- Desenvolver e implementar um modelo para estimar a linha de preamar de sizígia (LPS) a partir de imagens tomadas fora do instante da preamar de sizígia;
- Analisar estatisticamente os resultados obtidos com o modelo proposto; e
- Validar o produto para sua aplicação na produção ou atualização de cartografia náutica, seguindo os critérios estabelecidos pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI) e pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) brasileiro.

1.4 Potenciais contribuições científicas

A partir do estado da arte sobre o assunto ([KOMOLAFE et al., 2022](#); [MCALLISTER et al., 2022](#); [SOK et al., 2022](#); [NIJAMIR et al., 2023](#)), é possível afirmar que, a maioria deles tem como propósito central, ou faz referência, a análise de acresção e deposição de sedimentos ao longo de anos ou décadas. Neste sentido, percebe-se, no que é do nosso conhecimento, que são poucos os trabalhos cujo propósito central seja relacionar a linha de costa com *data* verticais, que envolvem os fenômenos relacionados com os ciclos de maré oceânica ([PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020](#)), como a preamar de sizígia.

Desse modo, este estudo pode oferecer contribuições para as pesquisas que investigam técnicas de extração de linha de costa instantânea. Por outro lado, o modelo proposto apresenta um potencial para análises de fenômenos de curto prazo em ambientes costeiros, uma vez que, seu foco não reside na avaliação da evolução das características físicas costeiras, mas sim na estimativa de um indicador para a linha de preamar durante o período observado.

6 Conclusões

A revisão bibliográfica realizada permitiu relacionar diversos conhecimentos que embasaram a definição do modelo utilizado no experimento, cujos resultados foram aqui apresentados. Das referências utilizadas destaca-se a revisão feita por [Boak e Turner \(2005\)](#), os fundamentos sobre maré apresentados por [Franco \(2009\)](#) e a metodologia de extração de linha de costa (LC) implementada por [Vos et al. \(2019\)](#).

A partir da fundamentação apresentada, foi possível verificar que a maioria dos trabalhos publicados neste tema têm como objetivo central o monitoramento de acreção e deposição de sedimentos em regiões de praias, decorrentes das dinâmicas costeiras. Por outro lado, alguns estudos se preocupam com o monitoramento de longo prazo associado com o aumento dos níveis globais dos mares, por exemplo. Entretanto, poucos são os estudos que têm por objetivo observar e modelar os sinais/eventos de curto prazo, como é o caso da preamar de sizígia.

Desta revisão, seguiu-se com o desenvolvimento da metodologia para a extração de medidas das linhas de costa instantâneas (LCIs) a partir de imagens orbitais ópticas. Nesta etapa, o uso do programa QGIS foi fundamental, por possuir uma série de ferramentas disponíveis, por meio de *toolboxes* além de uma *interface* amigável, o que muito facilita sua implementação. No entanto, as LCIs determinadas nas imagens não correspondem às linhas de preamar de sizígia (LPS). Assim, como solução para a transformação das medidas feitas das LCIs para LPS foi desenvolvido o modelo de Projeção de Maré. Este modelo foi implementado na linguagem Python, em um *script* denominado ANALICOS, que permite realizar a preparação dos dados, a estimação e a análise estatística da LC.

Com base na análise dos dados de entrada e após a realização dos experimentos, foi possível inferir que a metodologia utilizada neste trabalho para a extração da LC, utilizando o QGIS, foi suficiente para detectar as LCIs, considerando praias com grande amplitude de maré (meso e macromaré) e de baixa declividade, uma vez que neste trabalho a declividade média estimada foi 2,2%, enquanto a média global é de 10%. Os sinais de maré podem não ser uniformes para uma mesma faixa de areia, pois depende da declividade do perfil de praia, logo a técnica para a determinação desta declividade por amostras (utilizando transectos) foi um ponto importante deste trabalho.

Então, após a determinação desta declividade, para cada transecto, foi possível aplicar o modelo de Projeção da Maré (PM) para estimar a posição da linha de preamar de sizígia (LPS) e construí-la na forma de uma linha contínua (arquivo vetorial *shapefile*), visando a posterior comparação com dados de referência. Como referências foram utilizadas duas fontes: a LC extraída manualmente a partir de uma imagem do dia 27/08/2023 e a LC disponibilizada pela NOAA, e que está relacionada com uma LPS média.

Apesar dos resultados deste trabalho mostrarem que não foi possível atender aos critérios da OHI (OHI, 2020) para a incerteza no levantamento da linha de costa com 95% de confiança, o cálculo do PEC-PCD indica que é possível utilizar este produto em cartas nas escalas menores do que 1:100.000 (Classe A) e até mesmo 1:25.000 (Classe D). Isto pode representar até 70% das cartas náuticas brasileiras. Assim, das análises estatísticas e visuais dos dados, concluiu-se que a linha estimada pelo modelo proposto representa de forma suficiente a LPS, resguardada a acurácia que os produtos cartográficos exigem.

Portanto, este estudo alcançou os objetivos específicos de desenvolver um método para extração da LCI em imagens orbitais e desenvolver um modelo para estimativa da LPS, mesmo que não se tenha imagens observadas no período da maré de sizígia. No entanto, o objetivo específico de analisar o resultado com base em uma referência confiável foi atendido parcialmente, pois os produtos ficaram limitados à qualidade dos dados de entrada e de referência, como as imagens orbitais do Sentinel-2, as alturas de maré da RMPG e a LC da NOAA, não atendendo à totalidade dos produtos cartográficos náuticos.

Como sugestão para trabalhos futuros coloca-se: realizar a extração das LCIs a partir de imagens orbitais com maior resolução espacial; utilizar dados de referência de outras fontes e avaliar o método de Projeção de Maré para estas situações. Por fim, ressalta-se a necessidade da continuidade desse estudo para explorar a potencialidade deste tipo de técnica, avaliando novas aplicações, o atendimento aos critérios da OHI e, principalmente, definindo quais escalas cartográficas serão atendidas com este produto.

Referências

- ALBUQUERQUE, M. da G. *Morfodinâmica da Praia do Futuro, Fortaleza-CE*. 150 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) — Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2008.
- ALTINUC, S. O.; KEÇELI, 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.
- ARMAROLI, C. et al. An integrated study of shoreline variability using gis and argus techniques. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 473–478, 12 2006.
- BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, Coastal Education and Research Foundation, v. 2005, n. 214, p. 688 – 703, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.2112/03-0071.1>>.
- CARTWRIGHT, D. E.; TAYLER, R. J. New Computations of the Tide-generating Potential. *Geophysical Journal International*, v. 23, n. 1, p. 45–73, 06 1971. ISSN 0956-540X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1971.tb01803.x>>.
- CHANG, F.-J.; LAI, H.-C. Adaptive neuro-fuzzy inference system for the prediction of monthly shoreline changes in northeastern taiwan. *Ocean Engineering*, v. 84, p. 145–156, 2014. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801814001097>>.
- DHN. *CARTA 12000 (SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E TERMOS USADOS NAS CARTAS NÁUTICAS BRASILEIRAS)*. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2022. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-publicacoes/carta-12000-int-1>>.
- DOODSON, A.; WARBURG, H. *Admiralty Manual of Tides*. Taunton: H.M. Stationery Office, 1941.
- DSG. Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre. In: *ET-ADGV-Defesa F Ter*. Exército Brasileiro, 2016. p. 85. Disponível em: <https://bdgex.eb.mil.br/portal/media/adgv/ADGV_Defesa_FT_2016_2a_Edicao_2016.zip>.
- FRANCO, A. dos S. *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão*. 2º. ed. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2009. ISBN 978-85-7293-058-1.
- GILL, S.; SCHULTZ, J. *Tidal datums and their applications*. [S.l.]: NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1, Silver Spring MD, NOAA, NOS Center for Operational Oceanographic Products and Service, 2001. 102 p.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital image processing*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008. ISBN 9780131687288 013168728X 9780135052679 013505267X.
- IBGE. *Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2011. ISBN 978-85-240-4219-5.

IHO. *S-32 IHO Hydrographic Dictionary*. 2019. Acesso em 15 de janeiro de 2022. Disponível em: <<http://iho-ohi.net/S32/>>.

KOMOLAFE, A. A. et al. Spatio-temporal analysis of shoreline positional change of ondo state coastline using remote sensing and gis: A case study of ilaje coastline at ondo state in nigeria. *Earth Systems and Environment*, v. 6, n. 1, p. 281–293, Jan 2022. ISSN 2509-9434. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00270-1>>.

KUMAR, L.; AFZAL, M. S.; AFZAL, M. M. Mapping shoreline change using machine learning: a case study from the eastern indian coast. *Acta Geophysica*, v. 68, n. 4, p. 1127–1143, Aug 2020. ISSN 1895-7455. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11600-020-00454-9>>.

KVALE, E. P. The origin of neap–spring tidal cycles. *Marine Geology*, v. 235, n. 1, p. 5–18, 2006. ISSN 0025-3227. Proceedings of the 6th International Congress on Tidal Sedimentology (Tidalites 2004). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322706002544>>.

LIMA, O. P. D. *Localização geodésica da linha da preamar média de 1831 – LPM/1831, com vistas à demarcação dos terrenos de marinha e seus acrescidos*. 270 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LIU, D.; YU, J. Otsu method and k-means. In: *2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 344–349.

LUIJENDIJK, A. et al. The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 6641, Apr 2018. ISSN 2045-2322. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>>.

MCALLISTER, E. et al. Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, v. 174, p. 104102, 2022. ISSN 0378-3839. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383922000229>>.

MENTASCHI, L. et al. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 12876, Aug 2018. ISSN 2045-2322. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>>.

NIJAMIR, K. et al. Geoinformatics application for estimating and forecasting of periodic shoreline changes in the east coast of ampara district, sri lanka. *Ocean & Coastal Management*, v. 232, p. 106425, 2023. ISSN 0964-5691. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096456912200401X>>.

OHI. *S-44 - Standards for Hydrographic Surveys*. Monaco: International Hydrographic Organization, 2020. Disponível em: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.0.0_EN.pdf>.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações*. 1º. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2008. ISBN 9788522105953.

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>>.

ROBERTSON, W. et al. Mapping Shoreline Position Using Airborne Laser Altimetry. *Journal of Coastal Research*, Coastal Education and Research Foundation, v. 20, n. 3, p. 884 – 892, 2004. Disponível em: <[https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20\[884:MSPUAL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20[884:MSPUAL]2.0.CO;2)>.

SCARDINO, G. et al. Sea-level rise and shoreline changes along an open sandy coast: Case study of gulf of taranto, italy. *Water*, v. 12, p. 1414, 05 2020.

SHI, W.; CHEUNG, C. Performance evaluation of line simplification algorithms for vector generalization. *The Cartographic Journal*, Taylor & Francis, v. 43, n. 1, p. 27–44, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/000870406X93490>>.

SILVA, F. R. R. da. *Atualização de contornos em cartografia náutica baseada em imagens de vídeo e dados do sensor HRV-pancromático*. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SOK, K. et al. Seven decades of shoreline changes along a muddy mangrove coastline of the upper gulf of thailand. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 47, n. 6, p. 1425–1438, 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.5324>>.

VOS, K. et al. 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. et al. 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>>.

WESSEL, P.; SMITH, W. H. F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *J. Geophys*, v. 101(B4), p. 18741–8743, 1996. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JB00104>>.

ZEINALI, S.; DEHGHANI, M.; TALEBBEYDOKHTI, N. Artificial neural network for the prediction of shoreline changes in narrabeen, australia. *Applied Ocean Research*, v. 107, p. 102362, 2021. ISSN 0141-1187. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118720309214>>.