

USO DE FERRAMENTA DE ANÁLISE DIGITAL DA LINHA DE COSTA PARA IDENTIFICAÇÃO DE EFEITOS SAZONAIS/ROTACIONAIS NOS ANOS DE 2015 A 2021 NO ARCO PRAIAL ARPOADOR-LEBLON, RJ

USE OF DIGITAL SHORELINE ANALYSIS SYSTEM TO IDENTIFY SEASONAL/ROTATIONAL EFFECTS FROM 2015 TO 2021 IN THE ARPOADOR-LEBLON BEACH ARC, RJ

 Luiza Neves dos Santos ¹
 Thiago Gonçalves Pereira ¹

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo

Estudos sobre as variações da linha de costa geralmente procuram demonstrar tendências de médio e longo prazo, porém, compreender os deslocamentos de curto prazo é essencial para o entendimento da morfodinâmica em praias encaixadas, auxiliando na avaliação da vulnerabilidade a eventos extremos e na gestão do litoral, principalmente em orlas urbanizadas. O efeito rotacional é um fenômeno que pode se manifestar de maneira sazonal, onde a troca de sedimentos é realizada dentro de seu próprio arco praial, transportando sedimentos de um extremo ao outro da praia. Nesse sentido, o presente estudo investiga o comportamento interanual da linha de costa no arco praial do Leblon-Arpoador (RJ), entre os anos de 2015 e 2021, utilizando imagens do Google Earth Pro analisadas via Digital Shoreline Analysis System (DSAS). O objetivo é avaliar a ocorrência do efeito rotacional, caracterizado pela migração alternada de sedimentos entre os extremos do arco, em resposta à sazonalidade do clima de ondas. Os resultados apontam para acumulação de sedimentos no setor oeste e recuo discreto no setor leste durante o verão, ocorrendo o inverso no inverno, confirmando assim o efeito rotacional. Com procedimentos adequados, a ferramenta mostrou-se eficiente para identificar variações sazonais e estudar a dinâmica costeira de curto prazo.

Palavras-chave: Transporte sedimentar; Sazonalidade; Clima de ondas; Orlas urbanizadas; Geotecnologias.

Abstract

Studies on shoreline variations generally aim to demonstrate medium- and long-term trends. However, understanding short-term displacements is essential for comprehending the morphodynamics of embayed beaches, aiding in the assessment of vulnerability to extreme events and in coastal management, especially in urbanized waterfronts. The rotational effect is a phenomenon that can occur seasonally, where sediment exchange takes place within its own beach arc, transporting sediments from one end of the beach to the other. This study investigates the interannual behavior of the shoreline in the Leblon-Arpoador (RJ) beach arc between 2015 and 2021, using Google Earth Pro images analyzed with the Digital Shoreline Analysis System (DSAS). The main objective is to evaluate the occurrence of the rotational effect, characterized by the alternating migration of sediments between the arc's ends, in response to wave climate seasonality. The results indicate accumulation of sediments in the west and slight retreat in the east during summer; in winter, the opposite occurs, thus confirming the rotational behavior based on seasonal wave climate variation. Though not designed for this purpose, with proper procedures the DSAS proved efficient in identifying short-term variations, generating consistent data that highlight seasonal shoreline changes and demonstrate its potential for short-term coastal dynamics studies.

Keywords: Sediment transport, Seasonality, Wave climate, Urbanized waterfronts, Geotechnologies.

Recebido em: 05/06/2025 | 08/06/2026

Correspondência para: Luiza Neves dos Santos (luizaneves3112@gmail.com)

INTRODUÇÃO

A compreensão da dinâmica da linha de costa (LC) é essencial para a caracterização de ambientes litorâneos, especialmente em praias urbanas sujeitas a rápidas variações morfodinâmicas. A configuração da praia resulta da interação contínua entre forçantes oceanográficas e meteorológicas sobre depósitos sedimentares inconsolidados. Isso pode indicar tendências que apontam para estabilidade, progradação ou retrogradação da LC, manifestando-se em processos de sedimentação e erosão, bem como em mudanças





momentâneas de acresção ou subtração de sedimentos com reflexos diretos na largura e composição da faixa de areia (Martins, 2004; Rocha e Fernandez, 2021).

Mudanças momentâneas da LC normalmente estão associadas a variações sazonais que refletem a interação dos processos costeiros com a morfologia da praia (Caliari, 2003; Wright e Short, 1984). Linhas de costa que apresentam variações sazonais de efeito rotacional (*beach rotation*) costumam ocorrer em praias encaixadas entre promontórios não muito distantes entre si, sem trocas significativas com áreas vizinhas. Nesses casos, a mobilidade sedimentar entre os extremos do arco praial é maior, ocasionando a deposição ou a retirada dos sedimentos próximos aos promontórios de maneira alternada – os sedimentos são retirados de um extremo e depositados no outro. Esse transporte de sedimentos pode ser condicionado pela ação de ondas de tempo bom ou de tempestade a partir da obliquidade de incidência das ondas, que geram um residual de transporte litorâneo paralelo à costa (Bryan *et al.*, 2013; Gouveia, 2015; Pereira *et al.*, 2019).

Com os avanços das tecnologias de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens, o uso da geotecnologia tem se tornado cada vez mais recorrente nos estudos costeiros, permitindo a aplicação de ferramentas para a identificação do posicionamento da LC. Luijendijk *et al.*, (2018) e Almeida *et al.*, (2021) comunicaram, respectivamente, as plataformas AquaMonitor e CASSIE, as quais operam através da plataforma *Google Earth Engine*. Essa infraestrutura permite acesso a imagens de satélite atualizadas de todo o planeta, possibilitando a detecção de praias arenosas e o monitoramento das posições das LCs, o que permite identificar áreas sujeitas a acresção ou erosão.

O *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) é outra ferramenta que pode ser utilizada para o estabelecimento da dinâmica da LC. Desenvolvido pela *United States Geological Service* (USGS) e disponibilizado no *software Arcmap 10.5*, o DSAS permite calcular estatísticas de variação da linha costeira com base em múltiplas posições espaço-temporais, permitindo a análise histórica da referida linha (Thieler *et al.*, 2009). Seu uso tem sido recorrente para análises em escala interdecadal como demonstrado em Lemos *et al.*, (2020), Machado *et al.*, 2021, Teixeira *et al.*, (2021), Almeida *et al.*, (2024), que aplicam a ferramenta como método para investigar tendências de comportamento em diferentes recortes espaciais. Porém, o uso do DSAS para identificação de fenômenos sazonais/rotacionais da linha de costa em escalas temporais mais curtas, especialmente intra e interanuais, ainda é limitada.

A escassez de estudos com esse enfoque metodológico motivou a presente pesquisa, que propõe o uso do DSAS para análise em recortes temporais reduzidos, com o objetivo de identificar padrões sazonais cíclicos da LC que não estejam associados a tendências absolutas de resultantes de progradação ou retrogradação (intradecadal ou interdecadal). Isso se justifica na medida em que trabalhos dessa natureza, normalmente dependem de levantamentos em campo com equipamentos como Estação Total e GNSS-RTK ou ainda com a utilização de balizas de Emery (Muehe *et al.*, 2020), métodos que, apesar de sua relevância, não são sempre viáveis devido à disponibilidade de tempo para idas a campo, as despesas de deslocamento e a utilização de aparelhos de elevado custo.

Carvalho *et al.* (2021), Gonçalves *et al.* (2021) e Santos (2024) já identificaram a ocorrência sazonal do efeito rotacional no arco praial Arpoador-Leblon, o que destaca este trecho da orla carioca como uma área promissora para a aplicação do DSAS em uma abordagem metodológica alternativa. Posto isso, esse trabalho tem como objetivo avaliar o



comportamento da linha de costa do arco praial Arpoador-Leblon no município do Rio de Janeiro, a partir da utilização da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System*, para a identificação de características cíclicas e sazonais em intervalos temporais mais curtos (interanuais), entre os anos de 2015 e 2021.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na zona sul da cidade do Rio de Janeiro, abrangendo as praias urbanas do Arpoador, de Ipanema e do Leblon (Figura 1), que juntas apresentam aproximadamente 4 km de extensão de faixa de areia. Trata-se de praias urbanizadas, cuja ocupação se intensificou a partir do final da década de 1930, quando os bairros já se encontravam consolidados e apresentavam intervenções na faixa de areia, como a construção de muros e escadas. Nesse período, as dunas e a vegetação de restinga praticamente já não existiam em seu aspecto natural (Lins-De-Barros *et al.*, 2019). Atualmente, são praias com forte presença de adensamento urbano e estruturas artificiais em sua retaguarda.

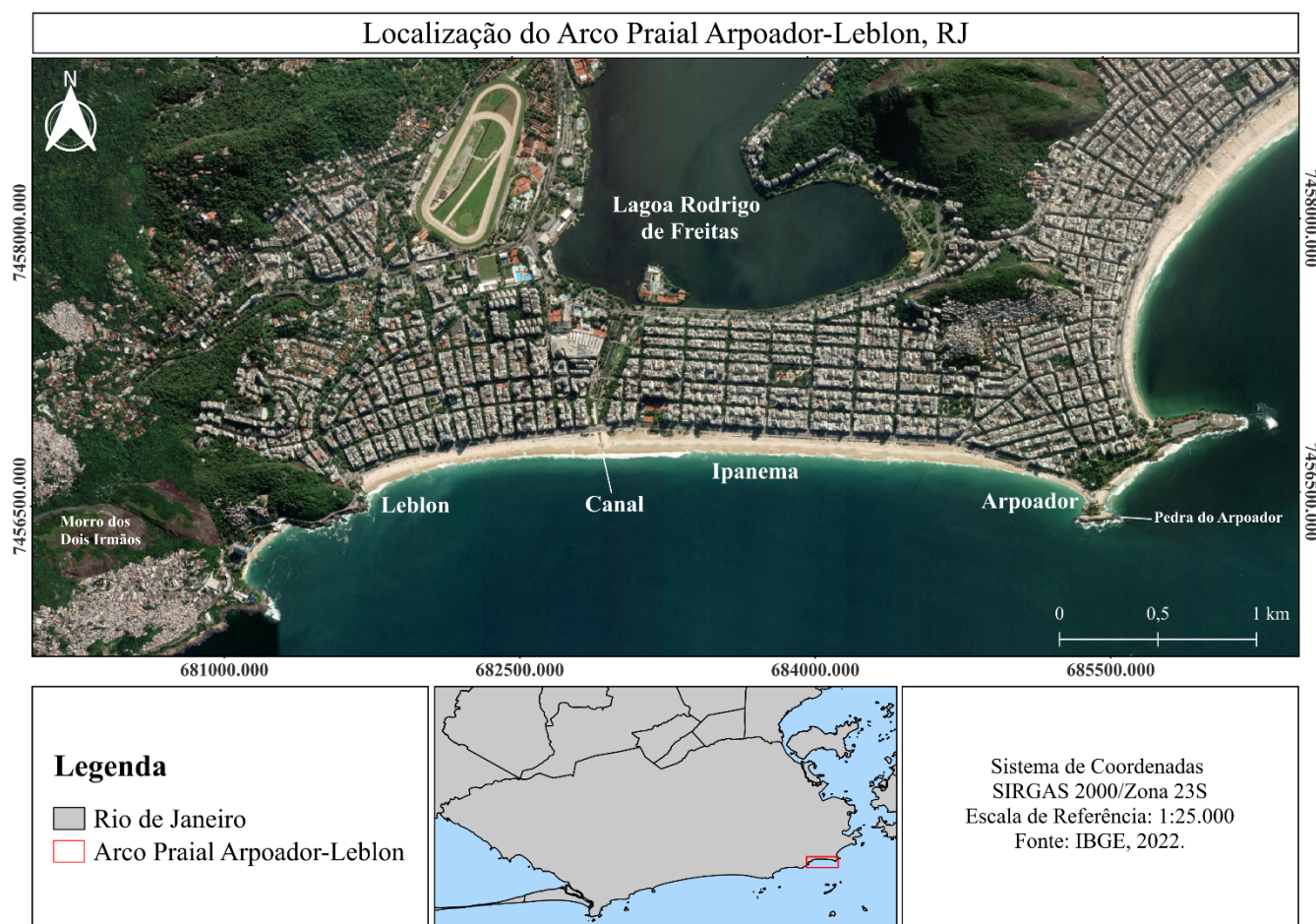
Essas praias estão localizadas entre os promontórios do Morro dos Dois Irmãos à oeste, onde se inicia a Praia do Leblon, e à leste a Pedra do Arpoador, dando início a Praia do Arpoador. A Praia de Ipanema está situada no setor central do arco e é delimitada a partir do Canal do Jardim de Alah, que faz a ligação artificial do mar com a Lagoa Rodrigo de Freitas presente na retaguarda do arco, e à sua frente localiza-se o arquipélago das Ilhas Cagarras (Figura 1).

Neste trecho da costa a orientação do litoral e da plataforma continental é na direção leste-oeste a partir do Cabo Frio até o Sul do Estado do RJ, resultado dos alinhamentos estruturais do embasamento cristalino, sendo resultado da zona de fratura do Rio de Janeiro (Muehe, 1998). Essa orientação expõe o arco praial em estudo à incidência de ondulações provenientes de SE (Sudeste), S (Sul) e SSO (Sul-Sudoeste), associados a passagem de sistemas frontais e ciclones extratropicais. São responsáveis pela formação de tempestades e condições de mau tempo, com ondulações que podem atingir 4 metros de altura (Parente *et al.*, 2014). Já as condições de tempo bom são influenciadas pelos sistemas de alta pressão no Atlântico Sul, como o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), com ventos e ondulações provenientes de ENE (Leste-Nordeste), que, em razão do alinhamento leste-oeste da costa não estar aliado à direção de incidência das ondas, têm sua trajetória alterada e sua energia reduzida pelo processo de refração (Klumb-Oliveira, 2015).

As ondas atingem o arco praial de forma oblíqua geram correntes de deriva litorânea responsáveis pelo transporte de sedimentos paralelamente à linha de costa. Esse movimento contínuo resulta em áreas de remoção e deposição de sedimentos, sendo um dos principais fatores responsáveis pelas constantes transformações e pela configuração das praias (Muehe, 2022). A curto prazo este arco não recebe aporte significativo de praias adjacentes como a Praia de Copacabana e a de São Conrado. As trocas sedimentares ocorrem internamente no trecho segmentado entre os promontórios rochosos, por transporte longitudinal à linha de costa e transversal, induzido por ondas de tempestade, onde o material sedimentar emerso é erodido e transportado para a zona submersa, formando bancos de areia e alterando a morfologia da praia (Rosman e Valentini, 1988; Muehe e Valentini, 1998; Lins-de-Barros, 2010; Santos, 2024).



Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste na aplicação da ferramenta DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) para identificar o comportamento da linha de costa no arco praial selecionado, através da produção de dados de forma semi-automática.

Primeiramente, visando uma análise de comportamento cíclico em escala interanual, foi definido o recorte temporal a partir da disponibilidade de imagens de satélites obtidas no *Google Earth PRO* com boa qualidade visual e sem sobreposição de cenas. Foram selecionadas imagens representativas de condições de verão: fev/2015, fev/2016, dez/2017, jan/2019, jan/2020 e fev/2021; e de inverno: ago/2015, jul/16, jul/18, jul/19, jul/20 e jul/21. Devido à dificuldade de captação de imagens nos anos de 2017 e 2018, optou-se pela junção do intervalo de tempo desses anos, utilizando-se o verão de 2017 e o inverno de 2018 para manter a continuidade da série.

Duas opções de fontes de imagens foram consideradas: o *Google Earth Pro* e as imagens de uso gratuito dos satélites *Sentinel* e *Landsat*. Apesar do Google disponibilizar



mosaicos de imagens com metadados limitados, ele oferece imagens com resolução espacial de 1,5 metros e maior frequência temporal (média de 2 imagens por ano no período de 2015 a 2021), o que supera a resolução das imagens dos satélites *Sentinel* (10 m) e *Landsat* (30 m) para a análise pretendida. Desse modo, foram selecionadas apenas imagens disponibilizadas Google Earth Pro, priorizando uma melhor resolução espacial e temporal. Após a seleção das imagens, o georreferenciamento foi realizado por meio da utilização do mosaico de imagens aéreas ortorretificadas pelo IBGE, Ortofoto 1:25.000 do Projeto RJ-25 de 2005.

Para mapear as mudanças, adotou-se como o indicador visual da linha de costa o contato úmido-seco do sedimento (Boak e Turner, 2005), identificado através da diferença das cores entre a areia seca e a areia molhada, o que permitiu a vetorização da linha de costa em cada imagem selecionada. Este indicador foi escolhido devido à sua facilidade de detecção nas imagens observadas, uma vez que a diferença de tonalidade foi claramente visível. Indicadores morfológicos, como dunas, restingas, escarpas e falésias, foram descartados pois não estão presentes nesse trecho do litoral. Da mesma forma, elementos antrópicos (escadarias, muros, calçadões) não foram considerados, por não refletirem a dinâmica natural da praia.

Considerando que a ferramenta DSAS foi originalmente projetada para analisar tendências de longo prazo, foram feitas adaptações metodológicas para possibilitar a identificação de possíveis variações sazonais. Para isso, foram criados 22 pontos vetoriais distribuídos de maneira equidistante ao longo do arco praial, com espaçamento entre eles de 180 metros, para calcular a largura da praia pela distância perpendicular entre a linha que divide a praia do calçadão e a linha de contato úmido-seco do sedimento. Esses pontos de medição foram denominados de P1 a P22, de oeste para leste (Figura 2).

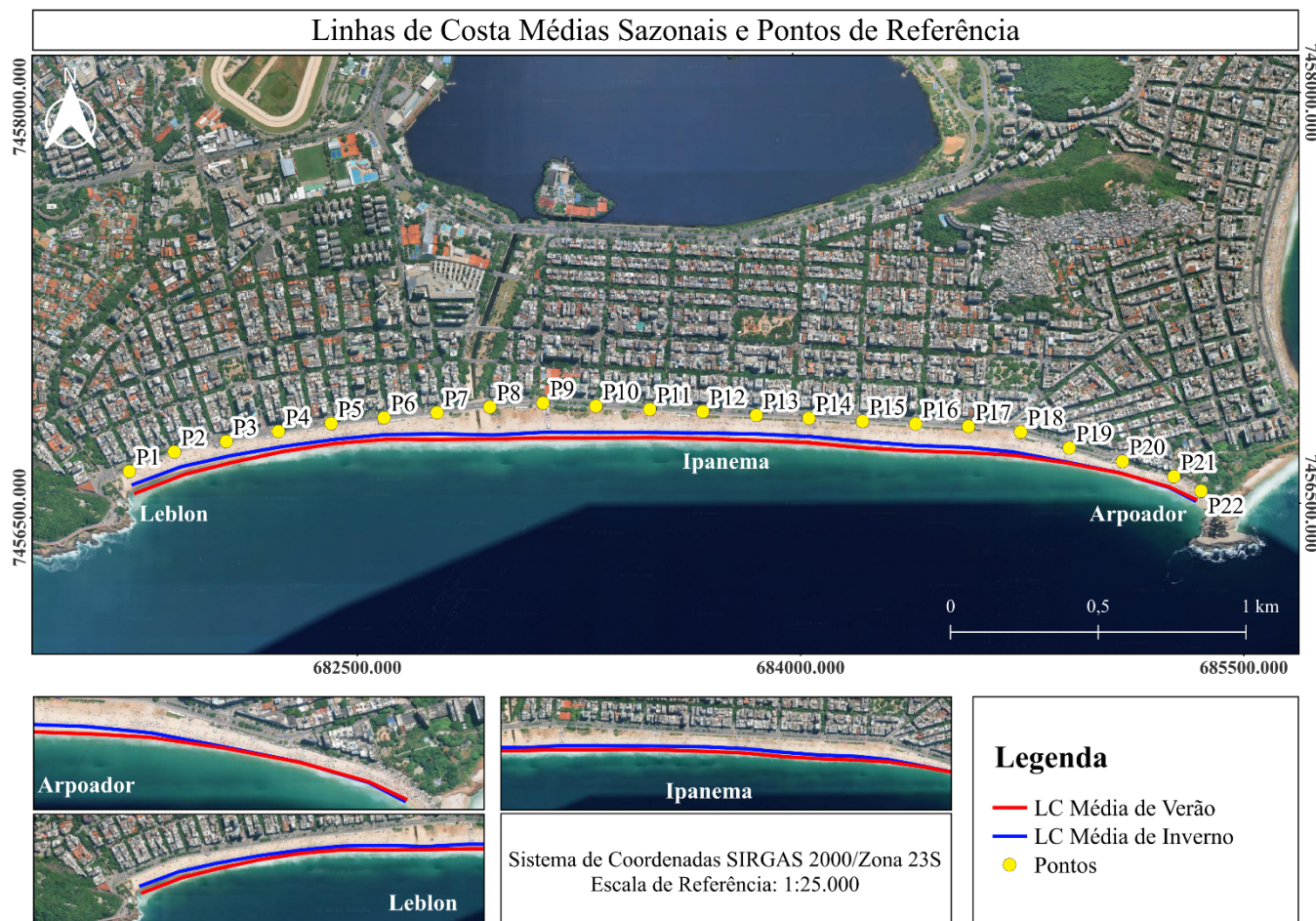
Por meio dos valores de largura em cada ponto e para cada ano, foram criadas uma linha de costa média para o verão e uma linha de costa média para o inverno. Essas médias foram obtidas a partir da média aritmética das larguras das 6 linhas de costa de cada estação (6 anos distintos entre 2015 e 2021), a fim de realizar uma comparação sazonal (Figura 2).

Em seguida, a ferramenta de aplicação do DSAS foi utilizada para calcular a diferenciação de distanciamento entre elas através do método da ferramenta EPR (*End Point Rate*). De acordo com Araújo *et al.*, (2009), esta ferramenta cria transectos através dos espaçamentos das LCs indicadas, e assim calcula a taxa de variação linear ao longo da costa, evidenciando maior ou menor distância entre as linhas de costa mais antiga e a mais recente, no caso do presente estudo, o cálculo dos transectos se deu a partir da distância entre a LC média de verão e a LC média de inverno.

Para a análise espacial dos resultados, o arco foi dividido em três setores. O setor oeste, que abrange a praia do Leblon, desde o Morro dos Dois Irmãos até o Canal do Jardim de Alah; o setor central, que vai do Canal do Jardim de Alah até o P18, que se encontra mais próximo ao Posto 8, utilizado neste trabalho como referência para a divisão das praias; e o setor leste, representando a praia do Arpoador, que inicia no ponto P18 e se estende até a Pedra do Arpoador.



Figura 2 – Linhas de costas médias de verão e inverno, e pontos de referência para o cálculo das médias.



Fonte: Elaborado pelos autores.

RESULTADOS

Os resultados da amplitude entre as LCs médias fornecidos pelo DSAS (Figura 3 e Tabela 1) apresentam uma significativa variação sazonal na largura da faixa de areia ao longo do arco praial.

No setor oeste (Praia do Leblon) observou-se a maior amplitude entre as LCs médias de verão e inverno, com variações percentuais superiores a 20%: (P1: 28,82%; P2: 20,79%; P3: 22,28%). Essa diferença em valores absolutos é de 33,02m, 31,26m e 25,74m, respectivamente (Figura 3 e Tabela 1).

No setor central, os dados indicam maior estabilidade sazonal, onde do P5 até o P15 apresentam um percentual de 12% até 15% a mais na largura da praia nos meses de verão. A diferença entre as larguras médias de verão/inverno varia de 14,72m (P8) a 23,29m (P13) (Figura 3 e Tabela 1).



A partir do P18, no setor leste do arco, onde localiza-se a Praia do Arpoador, a amplitude de variação da largura média entre verão/inverno diminui, sendo de 11,05m no P18, 3,0m no P19, e -0,19m no P20, onde se observa uma inversão: as linhas médias de verão, passam a ser mais recuadas que as de inverno. Do P21 ao P22 a inversão continua, com pequena tendência de aumento de largura da LC de inverno se comparada a de verão (3,75% e 9,37%, respectivamente), o que representa uma largura média de verão/inverno de -2,59m e -6,0m para os pontos P21 e P22 (Figura 3 e Tabela 1).

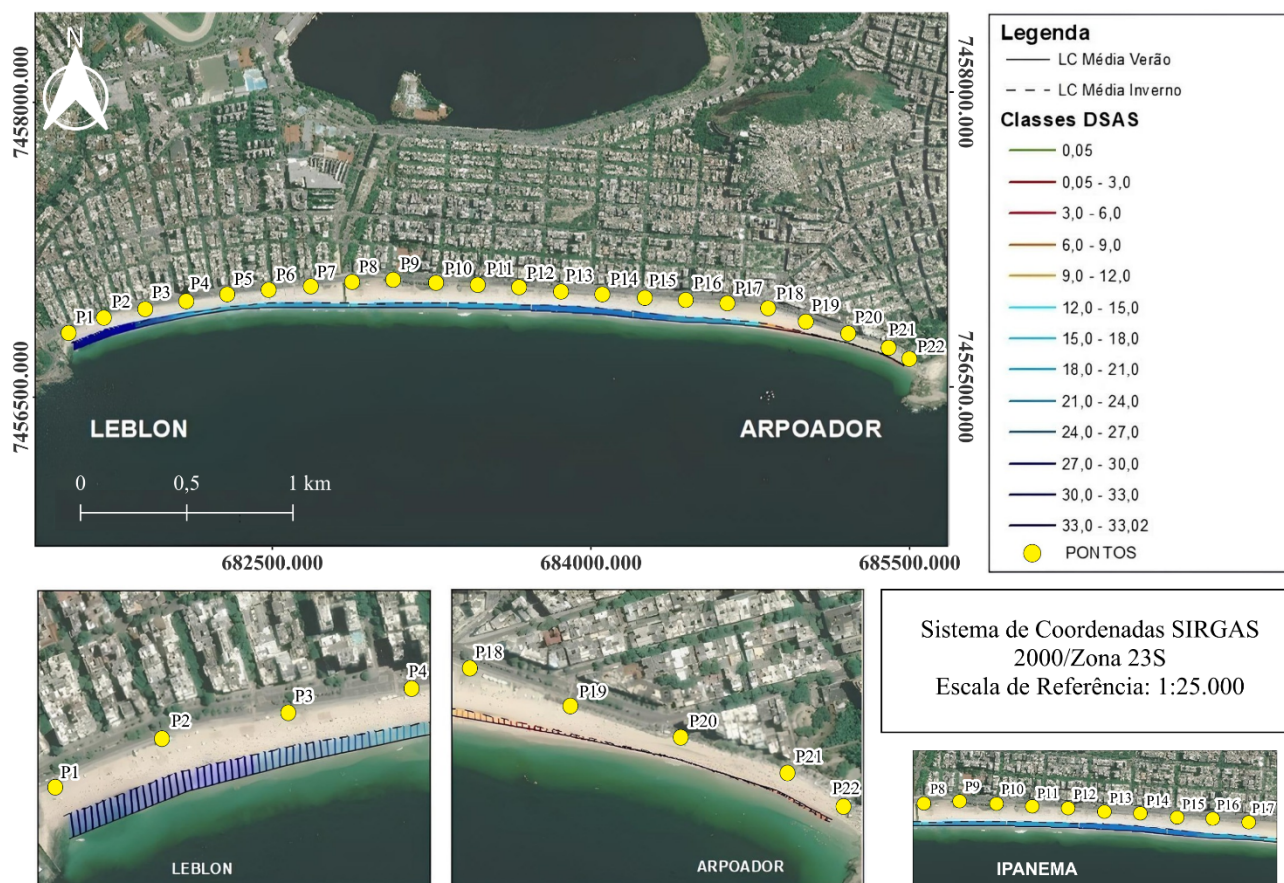
Tabela 1 – Dados produzidos pelo DSAS.

Localização	Pontos	Diferença entre as larguras médias de verão/inverno	Porcentagem
Leblon (oeste)	P1	33,02m	28,82%
	P2	31,26m	20,79%
	P3	25,74m	22,28%
	P4	17,99m	15,75%
Ipanema (central)	P5	14,82m	12,75%
	P6	17,1m	12,22%
	P7	20,82m	13,08%
	P8	14,72m	7,25%
	P9	20,6m	9,49%
	P10	20,47m	10,51%
	P11	18,6m	10,92%
	P12	21,02m	13,17%
	P13	23,29m	16,33%
	P14	22,59m	16,25%
	P15	22,79m	14,92%
	P16	19,54m	12,23%
	P17	18,79m	12,13%
Arpoador (leste)	P18	11,05m	7,39%
	P19	3m	3,28%
	P20	0,19m	0,27%
	P21	2,59m	3,75%
	P22	6m	9,37%

Fonte: Elaborado pelos autores.



Figura 3 – Linhas de costas médias de verão (linha contínua) e inverno (linha pontilhada) com valores de amplitudes calculados pelo DSAS, que podem ser vistos em detalhe nos extremos do arco.

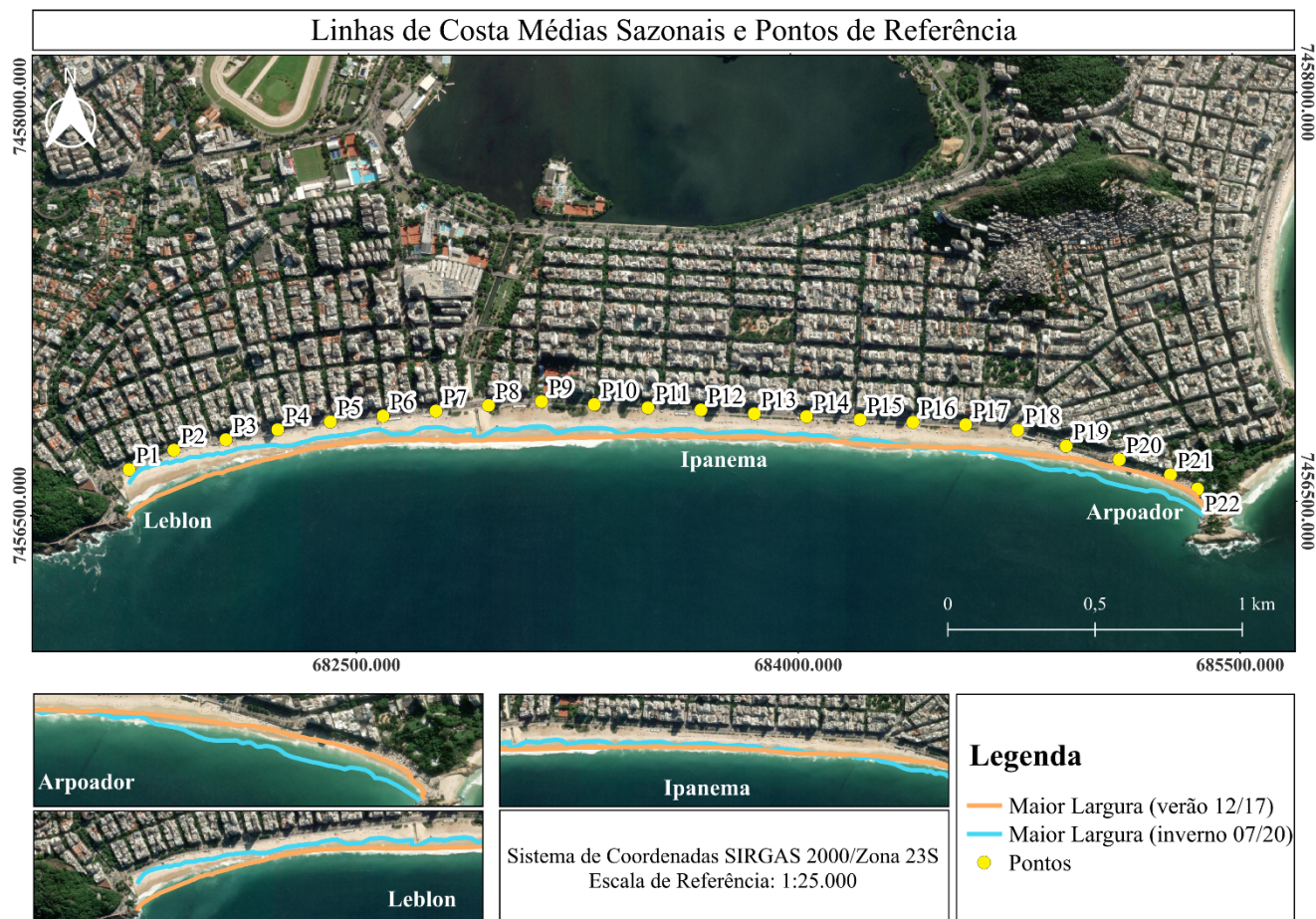


Fonte: Elaborado pelos autores.

Além do uso da ferramenta DSAS com as linhas de costa médias de verão e inverno, foi realizada uma análise complementar com base nas LCs com as maiores discrepâncias nas extremidades do arco de praia obtidos para a observação do fenômeno do efeito rotacional de praia. Foram selecionadas duas linhas de costa: uma referente ao verão de 2017 (dez/17) e outra ao inverno de 2020 (jul/20). Na linha representativa do verão, o setor oeste atingiu uma largura de praia de 121 metros, enquanto o setor leste apresentou 19 metros. Já na linha equivalente a estação de inverno, os valores observados foram de 14 metros de largura a oeste e 74 metros a leste (Tabela 2). A variação das amplitudes máximas entre as linhas de verão e inverno no intervalo de tempo estudado para o setor oeste é de 107 metros, o que representa uma variação de 88%, enquanto o setor leste apresentou variação de 55 metros ou 74%. É possível visualizar, na Figura 4, as LCs se cruzando no setor centro-leste.



Figura 4 – Mapa das linhas de costa com maior largura de verão (linha laranja) e inverno (linha azul), que podem ser vistos em detalhe nos extremos do arco.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 – Dados das maiores variações de largura de praia de verão e inverno.

Estação do ano	Largura da Praia: Arpoador (leste)	Largura da Praia: Leblon (oeste)
Verão	19m	121m
Inverno	74m	14 m

Fonte: Elaborado pelos autores.

DISCUSSÕES

Os dados apresentados representam características associadas ao fenômeno do efeito rotacional de praia. A rotação de praia ocorre devido às trocas de sedimentos ao longo do mesmo arco de praia, o que pode representar uma parcela significativa da largura da faixa de



areia emersa. Harley *et al.* (2011) atribuem esse fenômeno a mudanças de até 26% entre pontos extremos de um arco praial, por exemplo. Segundo Bryan *et al.* (2013) é definida como os movimentos da linha de costa por unidade de distância e ocorre devido ao transporte de areia entre as extremidades opostas de praias recortadas por promontórios rochosos.

Essas trocas de areia ao longo da praia são atribuídas a mudanças periódicas ou de longo prazo no clima de ondas, especialmente na direção de incidência das ondas (Short e Masselink, 1999; Ranasinghe *et al.*, 2004; Martins, 2004; Ojeda e Guillén, 2008; Thomas *et al.*, 2013). Além disso, uma das características que influenciam na ocorrência do fenômeno rotacional de praial, é a ausência de troca significativa de sedimentos com praias vizinhas (Rosman e Valentini, 1988), fazendo com que as trocas sedimentares ocorram a partir do próprio estoque existente nesse segmento do litoral, como observado na área de estudo. Isto significa que não obrigatoriamente há uma tendência de erosão ou acumulação no local, e sim a ocorrência de movimentos sazonais/rotacionais, relacionados a eventos de curto prazo que induzem esse comportamento da linha costa.

Praias com características semelhantes tendem a apresentar o mesmo fenômeno. Pereira *et al.*, (2019) e Pereira (2022) identificaram esse processo na Praia da Macumba, no Rio de Janeiro, uma praia com configuração semelhante ao arco praial estudado, com orla urbanizada e atuação de forçantes similares. Nesse caso, a destruição do calçadão no setor leste, localizado na retaguarda da praia, é recorrente durante eventos de alta energia. Esse setor também apresenta redução da faixa de areia, associada ao transporte de sedimentos para o outro extremo do arco nos períodos de verão, o que potencializa a chegada das ondas ao calçadão. Esse tipo de dinâmica não é exclusivo do Rio de Janeiro. Na Praia do Morro, no Espírito Santo, estudos também identificaram processos semelhantes, com impactos das ondas sobre estruturas antrópicas localizadas na retaguarda da praia (Oliveira, 2014). Padrões equivalentes são observados ainda em litorais fora do Brasil, como na Praia de Narrabeen, na Austrália, onde análises do clima de ondas e da direção das frentes frias influenciam no transporte sedimentar, demonstram processos de acreção e erosão em diferentes setores de praias encaixadas (Ranasinghe *et al.*, 2004).

Gonçalves *et al.*, (2021), com base em levantamentos de perfis de praia, identificaram que os extremos do arco praial entre o Leblon e o Arpoador apresentam as maiores variações na largura da faixa de areia emersa. Esses autores associam tal comportamento à atuação de uma deriva litorânea cuja direção se altera sazonalmente em função da incidência de ondas provenientes de várias direções. Os resultados obtidos no presente estudo corroboram as observações desses autores, ao evidenciar padrões semelhantes de variação sazonal e comportamento morfodinâmico nos setores opostos do arco.

De acordo com Klumb-Oliveira (2015), o clima de ondas para o litoral sul fluminense, demonstra predomínio de condições de baixa e média energia, com ondas de maior frequência (1-2m) provenientes de ENE-ESE com menores períodos, notadamente entre os meses que correspondem às estações da primavera e verão. Essas condições favorecem uma maior largura da praia emersa, com o transporte de sedimentos predominando da zona submarina para a porção emersa da praia. Já, ondas de maior energia, provenientes dos quadrantes S aumentam o estado de agitação marítima, com altura significativa acima de 2m e períodos mais longos. Essas ondas, predominam no outono e inverno, e estão associadas a períodos de menor largura da praia emersa pela retirada de sedimentos para a zona submarina.



Conforme observado por Santos (2024), as ondas provenientes de sudeste tendem a atingir com maior intensidade o extremo leste do arco. Essa incidência de ondas na Praia do Arpoador favorece o transporte longitudinal de sedimentos no sentido leste-oeste, promovendo a retirada de sedimentos da porção leste e o acúmulo no setor oeste do arco praial. Com a alternância da direção das ondas, o transporte sedimentar se inverte, ocorrendo de oeste para leste.

A estabilidade apresentada no setor central (Praia de Ipanema) pode estar relacionada a esse constante trânsito de sedimentos oriundos do transporte longitudinal entre as Praia do Leblon e Arpoador, assim como à influência da zona de sombra causada pelo arquipélago das Ilhas Cagarras, que protege a praia da incidência direta das ondas de alta energia (Bulhões, 2006).

O movimento rotacional observado neste estudo, pode estar relacionado não apenas com a deriva longitudinal de sedimentos, mas também pode ser potencializado pelo transporte transversal devido à erosão da praia emersa e posterior deposição de areias para além da zona de arrebenção. As variações sazonais mostram diferenças significativas nos ângulos de incidência e alturas das ondas. No entanto, ondas de tempestade costumam ter maior influência no transporte transversal de sedimentos do que no transporte longitudinal (Lins-de-Barros, 2010; Carvalho *et al.*, 2021).

Esse processo pode levar à diminuição significativa da largura média da praia no inverno em praticamente todo o arco praial, salvo o ponto extremo leste do arco praial, onde a linha de costa média se mostrou timidamente maior no inverno. Dessa forma, os dados aqui apresentados sugerem (mas não necessariamente implicam) uma troca de sedimentos ao longo da costa entre os setores oeste e leste do arco de praia, podendo ser resultado de ondas advindas de sudoeste atingindo diretamente a praia do Leblon e originando um transporte longitudinal de sedimentos para o Arpoador (Santos, 2024).

De acordo com os dados apresentados, tanto dos valores de largura média da praia no verão e inverno, como a análise sobre as LCs com as maiores variações na largura da praia entre as estações, mostram a ocorrência do efeito rotacional da praia a partir de um controle sazonal do clima de ondas (Figura 4), que afeta diretamente a morfodinâmica de praia, atuando de maneira distinta e mais evidente nos extremos do arco praial. Essa influência sazonal na morfodinâmica de praia já havia sido identificada por Carvalho *et al.* (2021), onde a orientação leste-oeste das praias oceânicas urbanas da cidade do Rio de Janeiro e sua exposição aos eventos meteoceanográficos de alta energia foram fatores apontados como preponderantes dessa dinâmica, sendo o inverno com maior magnitude desses eventos.

As variações morfológicas identificadas na área de estudo refletem respostas naturais da praia às forçantes meteoceanográficas atuantes, sem, necessariamente, indicar uma tendência consolidada de erosão ou acresção. No entanto, quando esses processos físicos são articulados à intensa pressão antrópica presente, evidenciam-se sinais de vulnerabilidade costeira. Trata-se de um trecho litorâneo densamente urbanizado, com significativa artificialização de sua retaguarda. Esse contexto resultou na eliminação de importantes elementos naturais de proteção, como as dunas e a vegetação de restinga (Lins-de-Barros *et al.*, 2019). A degradação desses componentes, fundamentais para a resiliência costeira, expõe diretamente as estruturas construídas à ação dinâmica do mar, especialmente durante eventos de maior energia, como as ressacas (Landry *et al.*, 2020).



Lins-de-Barros *et al.*, (2018) demonstram, através de uma pesquisa hemerográfica, que matérias jornalísticas relacionadas a eventos de ressaca citam as praias do Leblon e Ipanema 96 vezes entre os anos de 1979 e 2013, normalmente associadas a danos em estruturas pelo avanço do mar e com a migração de sedimentos para as avenidas da orla, gerando algum tipo de contratempo para a cidade. Esse mesmo trabalho apresenta dados quantitativos de notícias sobre ressacas e sua distribuição ao longo dos meses do ano para o estado do Rio de Janeiro. Na análise, os meses de inverno apresentam o maior número de ocorrência, o que corrobora os dados apresentados neste trabalho referentes ao recuo da linha de costa na praia do Leblon nos meses de junho.

Costa *et al.*, (2024) identificaram, a partir da correlação entre frentes polares atlânticas, registros de ressacas significativas e matérias jornalísticas, que a Praia do Leblon, dentre as analisadas, apresentou o maior percentual de frequência de impactos costeiros nos últimos 30 anos (1988-2017), totalizando 44 registros. Esses impactos estão associados à ocorrência de ressacas, geralmente geradas por frentes polares atlânticas, que, segundo o estudo, ocorrem com maior frequência entre os meses de junho e setembro, período correspondente ao inverno. Esse padrão ajuda a explicar a redução da largura da faixa de areia no setor oeste nessa estação do ano, impulsionada pelos sistemas frontais que impactam diretamente o balanço sedimentar desse setor.

Como toda faixa de areia do arco praial estudado apresenta alta artificialização na sua retaguarda e, por se tratar de um litoral exposto a ondas de alta energia, a orla do Leblon vivencia constantemente a ocorrência de eventos onde o mar e a areia alcançam o calçadão e os quiosques (Lins-de-Barros *et al.*, 2018). Já no lado oposto, no Arpoador, as ondas atingem o muro de concreto, ocorrendo, muitas vezes, o desaparecimento total de sua faixa de areia. Essas características também demonstram vulnerabilidade costeira e tendem a se intensificar com o aumento do nível médio do mar e a maior recorrência de eventos extremos associados ao atual cenário de mudanças climáticas. Esse cenário pode potencializar os impactos sobre o sistema praial, incluindo a redução da faixa de areia e danos em infraestruturas, além de comprometer a capacidade de resiliência costeira, ou seja, a recuperação natural do sistema costeiro após eventos de alta energia (Lins-de-Barros, 2010; Lins-de-Barros, 2011; Costa *et al.*, 2024).

Considerando os resultados apresentados, é possível concluir que as análises realizadas para caracterização da influência sazonal e efeito rotacional da linha de costa a partir de dados gerados pelo DSAS, são satisfatórios, estando a dinâmica mapeada de acordo com a literatura existente. O uso dessa ferramenta voltada para a temática abordada pode possibilitar a redução de custos e tempo em estudos dessa natureza, evitando a necessidade de inúmeras idas ao campo e demandadas com um monitoramento contínuo de longo prazo, algo que na realidade das universidades brasileiras nem sempre é possível.

Recentemente, Barbosa *et al.*, (2023) trazem a comparação das metodologias com o uso do DSAS, CASSIE e Aquamonitor, onde o DSAS e a ferramenta CASSIE, mostraram-se mais pertinentes em termos de estatísticas de taxas de variação da linha de costa. As principais vantagens do DSAS estariam na geração de diferentes estatísticas de variação da linha de costa, na possibilidade de classificação dos processos costeiros, e na definição personalizada de parâmetros. Porém, apresentam também limitações de sua utilização, como a



necessidade de vetorização prévia das linhas de costa, o que pode demandar maior esforço em análises de longos trechos ou de séries temporais extensas.

Contudo, cabe destacar que monitoramentos presenciais ainda são de grande importância e produzem dados pertinentes, inclusive para validação de dados semiautomáticos, como os propostos nesta pesquisa. Além de permitir a ampliação de estudos sobre arcos praias geograficamente próximos dos laboratórios de pesquisa, é possível também estudar praias que estejam mais distantes, possibilitando também a comparação entre arcos que possam apresentar o efeito rotacional/sazonal, mas que se encontram em diferentes locais no globo.

CONCLUSÕES

A análise do comportamento da linha de costa, como evidenciado no presente trabalho, é um processo fundamental para compreender a morfodinâmica das praias, pois ocorre geralmente como uma resposta rápida a erosão por eventos climáticos intensos e durante a recuperação dos estoques sedimentares por incidência de ondas construtivas, e/ou de orientação distinta, aumentando a largura da praia por deriva litorânea. Tal comportamento não implica necessariamente em perda ou ganho de sedimentos no sistema costeiro, mas uma troca de sedimentos ao longo da costa, tanto através de processos longitudinais quanto transversais.

No entanto, é de grande relevância o entendimento da dinâmica sazonal à qual o arco praial estudado está exposto, pois trata-se de uma orla urbanizada, com estruturas localizadas na faixa dinâmica da costa, que podem interferir no transporte sedimentar, comprometendo a estabilidade e aumentando a vulnerabilidade dessas áreas a eventos extremos ou até mesmo a processos erosivos sazonais de remobilização. Isso é particularmente evidente na Praia do Arpoador, setor leste do arco, onde há a presença de um muro na retaguarda, a qual, em alguns períodos do ano, tende a perder totalmente sua faixa de areia para o mar. Já no outro extremo do arco, a Praia do Leblon frequentemente apresenta episódios de migração de sedimentos sob as principais ruas da orla, como já relatado em diversos estudos.

Esses episódios estão relacionados à falta de integração entre o planejamento urbano e ambiental da zona costeira, que geralmente não leva em consideração a morfodinâmica dos ambientes costeiros. Consequentemente, essas intervenções alteram esses espaços a partir da sua artificialização, tornando-os mais vulneráveis e desacelerando o processo de resiliência costeira.

Apesar da ferramenta DSAS não ter sido desenvolvida para o tipo de análise apresentada, com algumas simples adaptações no processo, como por exemplo, trabalhar com médias de largura da praia e de posição da linha de costa para verão e inverno, mostrou-se eficiente na produção de dados consistentes sobre a morfodinâmica costeira. Posto isso, entende-se a possibilidade do uso do DSAS para análise de fenômenos de curto período e cíclicos, numa escala interanual de análise, e não apenas de longo prazo com alguma tendência estabelecida.



REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. P.; OLIVEIRA, I. E.; LYRA, R.; DAZZI, R. L. S.; MARTINS, V. G.; FONTOURA KLEIN, A. H. Coastal analyst system from space imagery engine (CASSIE): shoreline management module. *Environmental Modelling & Software*, v. 140, p. 105033, 2021.
- ALMEIDA, K. C. de; MACHADO, B. A.; SIMÕES, P. S. M.; FERNANDEZ, G. B.; ROCHA, T. B. da. Utilização do Digital Shoreline Analysis System para análise da linha de costa na planície de Caravelas-BA (1984–2024). In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2024, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: SBGFA, 2024.
- ARAÚJO, R. S.; SILVA, G. V.; FREITAS, D.; KLEIN, A. H. F. Georreferenciamento de fotografias aéreas e análise da variação da linha de costa. In: LYRA, R. (org.) *Metodologias em teledetecção aplicada à prevenção de riscos naturais no litoral*. 1. ed. [s.l.]: CYTED, 2009. p. 123–138.
- BARBOSA, M. G.; GONÇALVES, M. S.; VASCONCELOS, S. C. Estudo comparativo entre métodos de análise das mudanças na linha de costa: aplicação do DSAS, Aquamonitor e CASSIE sobre o litoral de São Miguel do Gostoso (RN). In: XIV Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2023, Corumbá, MS. *Anais Geomorfologia costeira, marinha, submarina e eólica*, p. 1-8.
- BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, v. 21, n. 4, p. 688–703, 2005.
- BRYAN, K. R.; FOSTER, R.; MACDONALD, I. Beach rotation at two adjacent headland-enclosed beaches. *Journal of Coastal Research*, n. 65, p. 2095–2100, 2013.
- BULHÕES, E. M. R. *Condições morfodinâmicas associadas a riscos aos banhistas: contribuição à segurança nas praias oceânicas da cidade do Rio de Janeiro, RJ*. 2006. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- CALLIARI, L.J.; MUEHE, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO JR, E. Morfodinâmica praial: uma breve revisão. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 51, p. 63-78, 2003.
- CARVALHO, B. C.; LINS-DE-BARROS, F. M.; DA SILVA, P. L.; PENA, J. D. N.; GUERRA, J. V. Morphological variability of sandy beaches due to variable oceanographic conditions: a study case of oceanic beaches of Rio de Janeiro city (Brazil). *Journal of Coastal Conservation*, v. 25, p. 1-16, 2021.
- COSTA, C.E.S.; VASCONCELOS, S. C.; ARMOUND, N.B. Sistemas Frontais e os Impactos de Eventos Extremos na Zona Costeira do Rio de Janeiro – RJ: análise dos últimos 30 anos. *Geo UERJ*, Rio de Janeiro, n.45, e80393, 2024.
- GONÇALVES, M. S.; VASCONCELOS, S. C.; SANTOS, I. S. Caracterização de variação sazonal da largura da praia no arco praial entre Arpoador-Leblon, Município do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 13., 2021, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: UFMG, 2021.
- GOUVEIA SOUZA, C.R. Variabilidade morfológica e granulométrica e balanço sedimentar de uma praia em rotação praial. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 6, n. 1, 2015.
- HARLEY, M. D.; TURNER, I.; SHORT, A.; RANASINGHE, R. A re-evaluation of coastal embayment rotation: the dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy–Narrabeen Beach, southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 116, n. F4, p. 4033, 2011.
- KLUMB-OLIVEIRA, L. A. *Variabilidade interanual do clima de ondas e tempestades e seus impactos sobre a morfodinâmica de praias do litoral sudeste do estado do Rio de Janeiro*. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- LANDRY, C. E., SHONKWILLER, J. S., & WHITEHEAD, J. C. Economic values of coastal erosion management: Joint estimation of use and existence values with recreation demand and contingent valuation data. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 103, 102364, 2020.
- LINS-DE-BARROS, F. M. *Contribuição metodológica para análise local da vulnerabilidade costeira e riscos associados: estudo de caso da Região dos Lagos, Rio de Janeiro*. 2010. 289 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.



- LINS-DE-BARROS, F. M. Análise integrada da vulnerabilidade costeira e riscos associados. In: Congresso Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, VI., 2011, Ilha de Boa Vista, Cabo Verde. *Anais....*
- LINS-DE-BARROS, F. M.; SAUZEAU, T.; GUERRA, J. V. Historical evolution of seafront occupation in France (Bay of Biscay) and Brazil (Rio de Janeiro) face to coastal erosion vulnerability and risks (19th-21th centuries). *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de Geografia*, n. 39, 2019.
- LEMONS, A. L. B.; SOPCHAKI, C. H. Contribuição da ferramenta Digital Shoreline Analysis System nos estudos de dinâmica costeira no estado do Ceará, Brasil. *Revista Equador*, v. 9, n. 3, p. 61–81, 2020.
- LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHER, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2018.
- MACHADO, B. A.; ROCHA, T. B.; OLIVEIRA FILHO, S. R. Evolução de linha de costa entre as praias de Atafona e Grussaí (RJ) em escala interdecadal (1954–2018), através da ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA – GEOMORFOLOGIA: COMPLEXIDADE E INTERESCALARIDADE DA PAISAGEM, 2021, Juiz de Fora. *Anais... Juiz de Fora: UFMG*, 2021.
- MACHADO, B. A.; ROCHA, T. B.; FERNANDEZ, G. B.; OLIVEIRA FILHO, S. R. Dinâmica da linha de costa no flanco meridional do delta do rio Paraíba do Sul entre 1954-2018: considerações sobre o fenômeno da erosão costeira em Atafona (RJ) e diferentes métodos de análise. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 25, n. 1, 2024.
- MARTINS, L. R.; TABAJARA, L. L.; FERREIRA, E. R. Linha de costa: problemas e estudos. *Revista Gravel*, Porto Alegre, n. 2, p. 40–56, 2004.
- MUEHE, D.; VALENTINI, E. *O litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental*. Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar, 1998.
- MUEHE, D.; CASTRO, L. B.; ALBINO, J. Perfis de praia: deve o método das balizas de Emery ser abandonado? *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 1, 2020.
- MUEHE, D. *Gestão de praias para as mudanças climáticas globais. Gestão de Praias*, p. 259, 2022.
- OJEDA, E.; GUILLÉN, J. Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology*, v. 253, n. 1-2, p. 51-62, 2008.
- PARENTE, C. E.; NOGUEIRA, I. C. M.; MARTINS, R. P.; RIBEIRO, E. O. Climatologia de ondas. In: MARTINS, R. P.; MATHESON, G. S. G. (orgs.). *Caracterização ambiental regional da bacia de Campos, Atlântico Sudoeste: meteorologia e oceanografia*. Rio de Janeiro: Elsevier, in press (Série Habitats), 2014.
- PEREIRA, T. G.; SALIBA, A.; GUZZO, A. Efeito rotacional de praia associado à erosão em trecho de orla: Praia da Macumba, Rio de Janeiro/RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 12., 2019, Ceará. *Anais... Ceará: SBGFA*, 2019.
- PEREIRA, T. Hotspots de erosão em orlas urbanas no litoral do Rio de Janeiro. In: COSTA, A. J. S. T.; TUNES, R. H. (org.). *Geografia do estado do Rio de Janeiro: estudos sobre cultura, globalização e natureza*. 1. ed. Rio de Janeiro: Consequência Editora, 2022. v. 1, p. 431–464.
- RANASINGHE, R. Índice de Oscilação Sul, clima de ondas e rotação de praias. *Marine Geology*, v. 204, n. 3-4, p. 273-287, 2004.
- ROCHA, T. B.; MAGALHÃES, B. L.; & FERNANDEZ, G. B. Escalas interdecadal e interanual na avaliação da dinâmica da linha de costa: Um estudo de caso nas praias de Rio Das Ostras (RJ). *Revista da ANPEGE*, v. 17, n. 33, p. 146-161, 2021.
- SANTOS, I. S. Caracterização morfossedimentar e os efeitos das ondas de tempestade no arco praial do Leblon ao Arpoador (Rio de Janeiro). 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- SHORT, A. D.; MASSELINK, G. Embayed and structurally controlled beaches. In: *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley and Sons Ltd, 1999. p. 230-250.



TEIXEIRA, C. P. B.; SOUTO, M. V. S.; PINHEIRO, L. R. D. S. G.; MATOS, M. D. F. A. de; GOMES, D. D. M. Análise da evolução costeira no município de Beberibe, estado do Ceará, entre os anos de 1979 a 2019. *Revista de Geociências da UNESP*, v. 40, n. 4, p. 1005–1031, 2021.

THIELER, E.; HIMMELSTOSS, E. A.; ZICHICHI, J. L.; ERGUL, A. O Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versão 4.0: uma extensão ArcGIS para calcular mudanças na linha costeira. *Serviço Geológico dos Estados Unidos*, 2009.

THOMAS, T.; PHILLIPS, M. R.; WILLIAMS, A. T. A centurial record of beach rotation. *Journal of Coastal Research*, n. 65 (10065), p. 594-599, 2013.

WRIGHT, L.D.; SHORT, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, v. 56, n. 1-4, p. 93-118, 1984.