

Metodologia para determinação do grau de exposição às ondas utilizando energia de ondas e respostas de perfis praiais, aplicada ao litoral sul do Espírito Santo

Branco EGUCHI¹ & Jacqueline ALBINO²

¹ Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Fernando Ferrari, 514, CEP 29.075-910 Vitória, ES, Brasil (bmeguchi@hotmail.com)

² Departamento de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Fernando Ferrari, 514, CEP 29.075-910 Vitória, ES, Brasil (albino.jacqueline@gmail.com)

Resumo. A energia de ondas que atinge a costa é determinada pelas ondas em mar aberto. No entanto, a interação com o leito marinho sobre a plataforma interna e antepraia, assim como a orientação da linha de costa, alteram o padrão energético de ondas sobre a costa. O presente estudo propõe uma metodologia para avaliar o grau de exposição à energia de ondas, considerando a interação das ondas com o leito marinho e a estabilidade de perfis de praia submetidos aos diferentes graus de exposição. Para tal, foram utilizados dados de ondas do modelo ERA5 e o modelo numérico OLUCA-MC, para simular a variação de energia das ondas em águas rasas para os seguintes cenários: Norte (337,5°-22,5°), Nordeste (22,5°-67,5°), Leste (67,5°-112,5°), Sudeste (112,5°-157,5°), Sul (157,5°-202,5°) e Sudoeste (202,5°-247,5°). A avaliação da resposta dos perfis praiais foi feita com base na variabilidade da altura da barreira e do volume sedimentar da praia emersa. Os resultados indicam que ondas dos quadrantes associados a maiores energias sofrem maiores dissipações ao se propagarem em direção a costa. Já as ondas dos quadrantes mais recorrentes apresentam incremento de sua energia ao se propagarem até a costa. Os perfis associados a maiores variações da energia de ondas apresentam maiores variações e tendências de redução da altura da barreira e volume da praia emersa. Conclui-se que o processo de dissipação energética de ondas sobre a plataforma interna e antepraia ocorre de forma diferenciada para cada direção de incidência e é corroborado pela variação dos perfis.

Palavras-chave: SMC Brasil, Dissipação de ondas, Morfologia da antepraia, Plataforma interna, Orientação linha de costa, Ondas em águas rasas.

Abstract. A METHOD TO QUANTIFY DEGREE OF EXPOSURE USING WAVE ENERGY AND BEACH PROFILE RESPONSES APPLIED TO SOUTH COAST OF ESPÍRITO SANTO. Wave energy that reaches the coast is determined by characteristics of deep-sea waves. However, as the waves propagate toward the coast, their energy change given the interactions with the seabed at the inner shelf and shoreface and due to orientation of the coastline. The present study proposes a methodology to assess the degree of exposure to wave energy, considering the interaction of waves with the seabed and beach profiles stability under different wave conditions. Thus, wave data from the ERA5 model and the numerical model OLUCA-MC were used to simulate the pattern of wave energy at shallow waters for the following scenarios: North (337.5° - 22.5°), Northeast (22.5° - 67.5°), East (67.5° - 112.5°), Southeast (112.5° - 157.5°), South (157.5° - 202.5°) and Southwest (202.5° - 247.5°). The evaluation of the profiles response was made based on the variability of height of the barrier and the emerged beach volume. The results indicate that the direction associated with the most energetic waves suffer intense dissipation as they propagate towards the coast. While waves related to the most recurrent directions increase their energy while propagating towards the coast. The profiles associated with a wide range of wave energy present greater variability and tendency to reduce barrier height and sedimentary volume. In conclusion, wave energy dissipation at inner shelf and shoreface occurs differently for each wave direction, corroborated by the beach profiles variation.

Keywords: SMC Brasil, Wave dissipation, Shoreface morphology, Inner Shelf, Coastline orientation, Shallow water waves.

1 Introdução

A energia de ondas que atinge a costa é determinada pelas ondas originadas em mar aberto a partir da ação mecânica dos ventos sobre a superfície do mar e controladas por fatores como duração, intensidade e pista de ventos. No entanto, ao se propagarem em direção a costa, as ondas estão sujeitas à interação com o leito marinho sobre a plataforma interna e a antepraia (Komar, 1998). Tal interação se traduz em processos de refração, difração e empinamento, que podem proporcionar incrementos ou dissipações da energia de ondas devido à: convergência ou divergência das ortogonais de ondas (Li *et al.*, 2020), mudança no padrão de ondas na zona de arrebentação e/ou alteração da dinâmica de formação de bancos arenosos submersos devido a troca sedimentar entre a praia emersa e antepraia (Hallermier, 1981; Short, 1999). Estes processos são os principais controles dos impactos gerados na linha de costa (Padilla-Hernández & Monbaliu, 2001; Matos *et al.*, 2014; Gon *et al.*, 2020). Segundo Trombetta *et al.* (2018), a morfologia do leito marinho pode levar a uma dissipação de até 90% da energia de ondas sobre o litoral.

Além da morfologia do fundo marinho, a orientação da linha de costa também controla o nível de energia das ondas em função do maior ou menor grau de exposição à entrada de ondas. A determinação do grau de exposição à energia de ondas do litoral pode ser feita a partir das características morfológicas do perfil praial (Da Silva *et al.*, 2020) e/ou de simulações de reanálises do clima de ondas, considerando a morfologia do fundo e a orientação da linha de costa (Bulhões *et al.*, 2014; De Souza *et al.*, 2016; Eguchi & Albino, 2018; Lins-de-Barros *et al.*, 2018; Firmino & Bulhões, 2020).

Para determinar o nível de proteção que a praia oferece contra a incidência de ondas avalia-se a elevação da praia e o volume de sedimentos. A elevação da praia protege a costa contra provável inundação e pode ser representada pela altura da barreira associada à praia, seja a berma, base da duna frontal ou base da falésia. Já o volume de sedimentos é a quantidade de sedimento da praia emersa que

garante a estabilidade da praia frente à possível erosão (Raaijmakers *et al.*, 2008; Viavattene *et al.*, 2015; Durán *et al.*, 2016).

A mobilidade do perfil praial em praias dominadas por ondas representa alterações cíclicas que envolvem a perda de sedimentos devido à ação de ondas altamente energéticas e a recuperação da praia com o retorno do sedimento em condições de ondas menos energéticas. Desta forma, maiores variações da altura da barreira e o volume da praia emersa ocorrem em resposta a maior variação da energia de ondas (Dodet *et al.*, 2019; Eichentopf *et al.*, 2019; Robin *et al.*, 2020; George *et al.*, 2021). Destaca-se que as praias expostas a elevados graus de energia de ondas tendem a reduzir sua altura e volume, tornando-se mais planas (Masselink *et al.*, 2014).

Na região sudeste do Brasil o clima de ondas é controlado pela atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), responsável pelos ventos alísios que sopram de norte, nordeste e leste (Lübbecke *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2017). As ondas formadas pelo ASAS são caracterizadas como de tempo bom e possuem baixa energia (Nogueira *et al.*, 2015). Este padrão se alterna com a passagem de frentes frias associadas a ciclones, que se desenvolvem entre 20°S e 57,5°S e migram da costa brasileira em direção ao continente africano (Reboita *et al.*, 2005; Parise, 2009). As ondas geradas por sistemas ciclônicos possuem alto potencial energético e são provenientes dos quadrantes sudeste, sul e sudoeste (Innocentini *et al.*, 2003).

Albino *et al.* (2016a) e Lins-de-Barros *et al.* (2018) descrevem a variação do grau de exposição às ondas incidentes ao longo do litoral sudeste do Brasil com base no clima de ondas sobre a plataforma continental externa. Porém, os efeitos das particularidades do litoral sobre as ondas incidentes são destacados em estudos que aplicam a propagação de ondas em águas rasas para incluir a interação das ondas com o leito marinho e a orientação da linha de costa (Bulhões *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2016; Eguchi & Albino, 2018; Bingölbalı *et al.*, 2020; Firmino & Bulhões, 2020; Patel *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020).

O presente estudo propõe testar, no litoral sul do Espírito Santo, uma metodologia para avaliação do grau de exposição às ondas. Esta metodologia se baseia, simultaneamente, na quantificação da energia de ondas sobre a plataforma interna e antepraia, e na variabilidade de perfis praias submetidos a diferentes condições de ondas.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Características da área de estudo

A porção do litoral estudado se encontra no litoral sul do estado do Espírito Santo e é caracterizada pelo contato dos tabuleiros da Formação Barreiras com a zona costeira, associada a planícies quaternárias pouco desenvolvidas, caracterizando um litoral com falésias vivas e dunas intensamente urbanizadas (Martin *et al.*, 1996). Segundo Albino *et al.* (2016a), a antepraia e a plataforma interna são ocupadas por terraços de abrasão, produto da erosão marinha das falésias. A impermeabilidade dos terraços de abrasão favorece o empilhamento de ondas e facilita a inundação das praias durante eventos de energia moderada a alta (Jackson & Cooper, 2009; Souza & Albino, 2020). De acordo com Albino *et al.* (2006), neste litoral as praias são inundadas sob condições de tempestades, induzindo a troca sedimentar da base da duna para a antepraia. Este sedimento retorna à praia emersa após a passagem do evento de alta energia. Sallenger (2000) apresenta uma proposta de caracterização do litoral de acordo com as condições de ondas, altura da maré e a resposta destas forçantes sobre a linha de costa. Segundo o autor quando alcance das ondas promove troca sedimentar entre a base da duna e a antepraia, mas não supera a altura da duna, o litoral é caracterizado como “estágio de colisão”. Desta forma, com base na descrição de Albino *et al.* (2006) e na classificação de Sallenger (2000), o litoral estudado encontra-se em “estágio de colisão” quando submetido a ação de tempestades.

A morfologia do fundo marinho na região da plataforma interna é extremamente irregular (Albino *et al.*, 2016a), a exemplo da presença de diversos bancos e baixos como o

Banco do Siri, cujo topo encontra-se a 7 m de profundidade, enquanto seu entorno possui profundidades de 15 m (Figura 1). Em escala de maior detalhe do fundo marinho, tem-se a rugosidade devido a presença dos terraços de abrasão. Estas irregularidades intensificam a interação do fundo marinho com as ondas incidentes e alteram padrões de incremento ou redução da energia das ondas (Poate *et al.*, 2018), que juntamente com a orientação da linha de costa vão determinar o grau de exposição do litoral à energia de ondas.

Através de modelagem numérica, Nogueira *et al.* (2015) definem três principais categorias de estado de mar com base nos sistemas meteorológicos que dominam a Bacia do Espírito Santo: a) Bom Tempo, com ondas de E e NE associadas ao ASAS; b) Bom Tempo com *swell*, que representa a condição de Bom Tempo com ondulações ou *swell* distante e c) Mau Tempo, com ondas de S e SE associadas aos sistemas frontais. Albino *et al.* (2016a) apresentam a climatologia de ondas do litoral a partir de dados de reanálise do banco de dados do modelo *Global Ocean Wave* (GOW) entre os anos de 1948 e 2008 a uma profundidade de 30m. Segundo os autores as ondas são predominantes dos quadrantes leste e sudeste com alturas significativas que variam entre 1 e 1,5 m. A variação da maré se enquadra no regime de micromaré, com preamar e baixamar de sizígia que atingem 1,8 e -0,2 m, respectivamente (DHN, 2021).

2.2 Materiais

2.2.1 Modelo SMC-Brasil

No presente estudo utilizou-se o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria (IH-Cantábria), amplamente utilizado para determinação da dinâmica de ondas, variabilidade de exposição e avaliação de processos erosivos em praias (ex.: De Almeida *et al.*, 2015; Albino *et al.*, 2016b; Rodriguez *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2017; Eguchi & Albino, 2018; Marcelino *et al.*, 2018).

A propagação de ondas monocromáticas foi realizada pelo modelo

OLUCA-MC, parte do sistema SMC-Brasil. O OLUCA-MC simula o comportamento de ondas sobre batimetrias irregulares, sendo um modelo fracamente não-linear que inclui os efeitos de refração, difração, empenamento, dissipação de energia por fricção com o fundo, quebra da onda e a interação onda-corrente (González *et al.*, 2007). As condições de contorno são abertas para o limite entre a malha e o oceano e fechadas para o limite da costa. As condições de contorno ao longo da costa são obtidas pela aplicação da aproximação parabólica para uma equação de

inclinação leve (Tsay & Liu, 1982; Kirby & Dalrymple, 1983). O modelo contém informações de batimetria da costa brasileira extraídos de cartas náuticas e folhas de bordo, porém permite que o usuário insira a batimetria de detalhe da área de interesse para maior acurácia da simulação. Além disso, é possível personalizar os cenários de ondas simulados inserindo dados de altura, período e direção. Como resultado, o modelo fornece alturas de ondas após processos de refração e difração devido à interação com o leito marinho para cada nó da malha modelada.

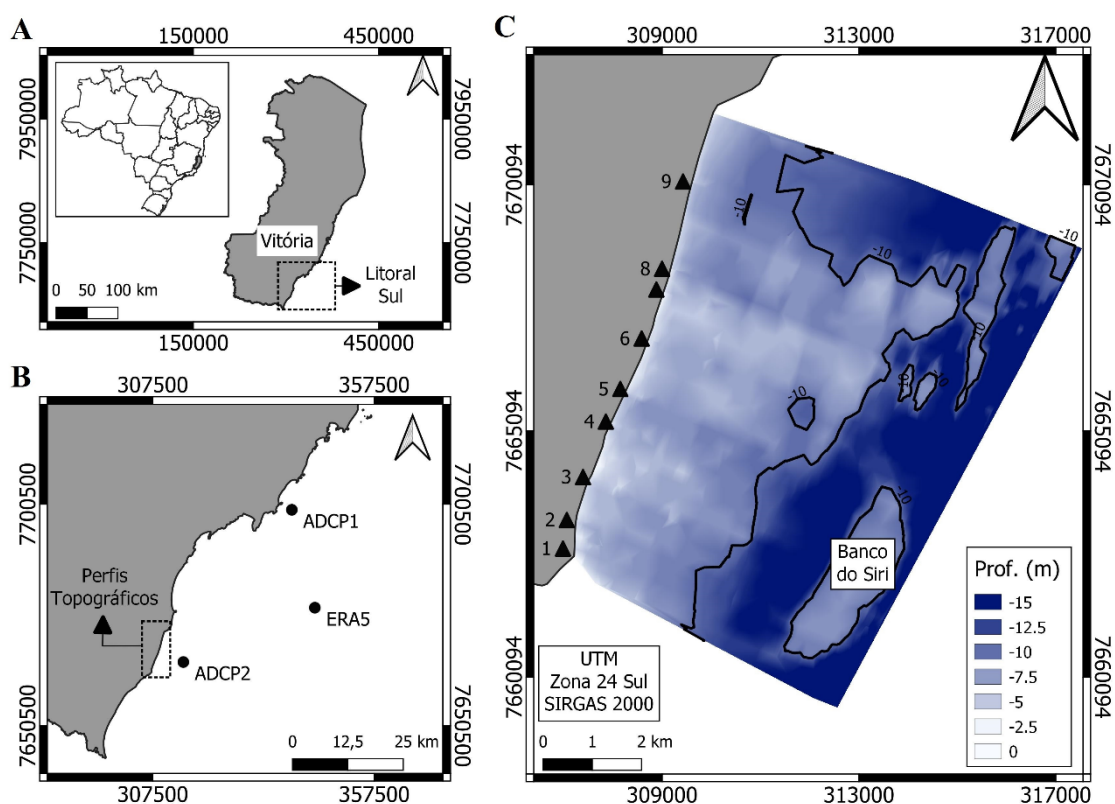


Figura 1. Localização da área de estudo. A) Localização do litoral sul do Espírito Santo; B) Arco praial estudado, pontos de medição de dados de ondas (ADCP1 e 2) e ponto central da malha do modelo ERA5; C) Distribuição dos perfis topográficos (triângulos) e a área onde a batimetria de detalhe foi levantada com Monofeixe de Alta Precisão e auxílio de moto aquática.

Figure 1. Study area location. A) Southern littoral of Espírito Santo; B) Studied beach sector, location of wave data measurement (ADCP 1 and 2) and ERA5 modeled wave data; C) Beach profiles along de coast (triangles) and area surveyed for bathymetric data.

2.2.2 Ondas - ERA5

Alturas significativas, períodos de pico e direções médias de ondas foram extraídos do banco de dados do modelo numérico de reanálise global ERA5, disponibilizado pelo

Centro Europeu Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) (Hersbach *et al.*, 2018). Os dados compreendem o intervalo entre 1979 e 2020 em uma resolução temporal de 1 hora e espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. O ponto escolhido se encontra a uma profundidade de

25 m, localizado nas coordenadas 21°S x 40,5°O (Figura 1).

Para validação dos dados do modelo ERA5, as ondas modeladas foram comparadas com ondas medidas in situ por dois Perfiladores Hidroacústico de Correntes (ADCP) localizados em 20,8°S x 40,5°O e 21°S x 40,8°O; a 25 e 15 m de profundidade, respectivamente (Tabela 1) (Figura 1).

Tabela 1. Intervalo de medição de dados de ondas para comparação com dados modelados do banco ERA5.

Table 1. Time interval of measured wave data for comparison with modeled data from ERA5 database.

	Início	Fim
ADCP1	09/06/2018	11/07/2018
	25/07/2006	09/12/2006
	02/02/2007	03/04/2007
ADCP2	30/09/2007	25/10/2007
	27/11/2007	18/12/2007
	25/08/2008	06/03/2008

A Tabela 2 apresenta o viés (Bias) e a raiz média dos erros quadráticos (RMSE) entre os dados de ondas medidos e modelados. O modelo ERA5 superestima as alturas significativas e os períodos de pico, no entanto, a diferença entre os valores modelados e medidos de altura significativa e período de pico é menor do que 0,3 m e 3 s, respectivamente. A direção média é

superestimada para o ADCP 1 e subestimada para o ADCP2, com um erro médio menor do que 40° em relação a ambos ADCPs. Os dados do modelo ERA5 apresentam menores erros quando comparados ao ADCP 1, possivelmente por se encontrarem em profundidades semelhantes. De maneira geral, os dados ERA5 representam bem o padrão de ondas local.

2.2.3 Topobatimetria

Foram realizadas 11 campanhas de levantamento de dados topográficos de perfis de praia entre os meses de fevereiro de 2018 e janeiro de 2020 em nove pontos utilizando técnica de Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK) (Figura 1). Os perfis se estenderam de marcos fixos (estacas) até o máximo recuo das ondas, o que permitiu determinar os parâmetros morfológicos de altura da barreira e volume sedimentar de cada perfil. As cotas dos perfis foram balizadas para a referência vertical do nível médio do mar no local de 0,82 m (DHN, 2020).

Em campanha única, foi realizada a aquisição de 49 perfis batimétricos de detalhe da antepraia até a profundidade máxima de 20 m, além de nove perfis batimétricos alinhados aos perfis topográficos, estendendo-os do nível médio do mar até a isóbata de 7 m. O levantamento batimétrico compreende uma área total de aproximadamente 70 km² (Figura 1), realizado com utilização de Monofeixe de Alta Precisão acoplado em moto aquática com calado de 0,25 m.

Tabela 2. Resultados da comparação entre os dados de ondas medidos e modelados.

Table 2. Bias and Root of mean squared error between modeled and measured wave data.

	Hs		Tp		Dm	
	Bias	RSME	Bias	RSME	Bias	RSME
ADCP 1	-0,15	0,28	-0,91	2,77	-9,19	36,45
ADCP 2	-0,30	0,22	-3,13	2,87	55,54	37,05

2.3 Métodos

2.3.1 Clima e distribuição de ondas

O clima de onda foi determinado com base nas alturas significativas, direções médias e períodos de pico dos dados do modelo ERA5, com intuito de caracterizar as ondas na área de estudo.

Para determinar a distribuição da energia de onda ao longo da costa, inicialmente calcularam-se as alturas significativas e os períodos de pico mais recorrentes para cada quadrante de direção média das ondas: Norte (337,5°-22,5°), Nordeste (22,5°-67,5°), Leste (67,5°-112,5°), Sudeste (112,5°-157,5°), Sul (157,5°-202,5°) e Sudoeste (202,5°-247,5°).

Em seguida, aplicando o modelo OLUCA-MC, foram feitas propagações monocromáticas das ondas mais recorrentes de cada quadrante de direção média. Com intuito de realizar uma análise quantitativa, foram extraídas as alturas de ondas à uma profundidade de 5 m para cada simulação. Em seguida, a Equação 1 (Holthuijsen, 2007) foi aplicada para calcular as variações energéticas das ondas entre a entrada da grade modelada e a isóbata de 5 m.

A avaliação da variação energética de ondas geralmente é feita com base em eventos de alta energia, sendo estes intensos, porém episódicos. Neste estudo a proposta é avaliar o padrão de variabilidade da energia de ondas mais recorrentes. Portanto, a última etapa consistiu em determinar a representatividade de cada quadrante. Para isso, a ocorrência de ondas de cada quadrante foi quantificada e dividida pelo total de ondas do banco dados ERA5. Este valor foi multiplicado pela variação energética do respectivo quadrante. Desta forma, os quadrantes mais recorrentes possuem significativa influência no comportamento da energia das ondas, mesmo que apresentem menores variabilidades.

Como resultado, foi determinado o potencial de incremento ou redução da energia de onda em cada perfil em função da interação com a morfologia do leito marinho considerando integralmente as características do clima de ondas.

$$\Delta E = \frac{1}{8} \rho g H_{entrada}^2 - \frac{1}{8} \rho g H_{3m}^2 \quad (1)$$

Onde ΔE representa a variação de energia por unidade de área, ρ a densidade da água do mar e H as alturas de ondas.

2.3.2 Mobilidade dos perfis

Para avaliar a resposta da praia em decorrência da variação energética de ondas, foram calculados os coeficientes de variação e correlação de Pearson (r). O coeficiente de variação (CV) foi determinado tanto para a altura da barreira quanto para o volume da praia emersa, pois permite comparar a dispersão de dados entre variáveis com médias e unidades diferentes (Crespo, 1991) (Equação 2). Já o coeficiente de correlação de Pearson (r) quantifica a relação entre duas variáveis (Figueiredo Filho & Silva Junior 2009), no presente estudo o coeficiente r foi usado para identificar tendências de incremento ou redução dos parâmetros morfológicos dos perfis de praia ao longo das 11 campanhas de levantamento topográfico (Equação 3).

$$CV = 100 \times \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

Onde CV representa o coeficiente de variação, μ é a média e σ o desvio padrão.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

Sendo x_i e y_i os valores de cada amostra, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ as médias.

2.3.3 Classificação quanto a exposição

Os impactos na linha de costa causados por ondas oriundas de mar aberto dependem da quantidade de energia dissipada ao longo de seu percurso sobre águas rasas e da capacidade das praias em se adaptar e absorver esta energia de ondas (Viavattene *et al.*, 2015; Durán *et al.*, 2016; Eguchi & Albino, 2018; Lins-de-Barros *et al.*, 2018; Firmino & Bulhões, 2020). Neste sentido, a proposta deste estudo é determinar classes de grau de

exposição levando em conta a quantificação da energia de onda sobre a plataforma interna e antepraia, em conjunto com a variabilidade dos perfis de praia.

Para isto, foi feita uma adaptação do conhecido Índice de Vulnerabilidade Costeira (CVI) proposto por Gornitz (1991). Segundo Ramieri *et al.* (2011) este índice permite classificar numericamente trechos do litoral de acordo com diversas variáveis. O modelo original de Gornitz (1991) utiliza taxa de variação da linha de costa, taxa de variação relativa do nível do mar, altura máxima de onda, amplitude de maré, geomorfologia e inclinação costeira. O presente estudo considera a altura das praias, volume sedimentar, redução da altura e do volume ao longo do tempo e o aumento da energia de ondas sobre a isóbata de 5 m para as condições de ondas mais recorrentes na área de estudo.

A aplicação e adaptação do CVI é identificada em diversos estudos, no entanto, este tipo de classificação depende a determinação de valores com base na experiência dos autores. No presente estudo foi determinado um Índice de Vulnerabilidade Costeira Normalizado (CVIn), que pode ser calculado estatisticamente de maneira direta e objetiva com base em valores absolutos coletados in situ ou extraídos de modelagem.

O primeiro passo foi normalizar as informações obtidas, para isto aplicaram-se as equações 4 e 5.

$$x_n = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4)$$

$$x_p = - \left(\frac{x - x_{max}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (5)$$

Onde x_n representa o valor normalizado de variáveis cujos valores altos aumentam o grau de exposição (redução da altura e do volume do perfil e aumento da energia de ondas sobre a isóbata de 5 m), x_p representa o valor normalizado de variáveis cujos valores altos reduzem o grau de exposição (Altura e volume sedimentar dos perfis de praia), x é o valor a ser normalizado e x_{max} e x_{min} representam,

respectivamente, os valores máximos e mínimos de cada variável.

Posteriormente, é determinado o CVIn pela Equação 6.

$$CVIn = \sqrt{\frac{(x_1 x_2 x_3 \dots)}{N}} \quad (6)$$

Sendo CVIn o índice de vulnerabilidade, x são os valores normalizados de cada variável e N o número de variáveis envolvidas. Desta forma, quanto maior o CVIn, mais alto será o grau de exposição.

As classes de CVIn foram definidas com base na divisão da totalidade de dados em quartis. Assim, valores de CVIn dentro do 1º quartil representam baixo grau de exposição. O intervalo entre o 1º e o 3º quartil compreende valores de moderado grau de exposição. Por fim, valores de CVIn maiores do que o 3º quartil se enquadram como alto grau de exposição.

3 Resultados

3.1 Clima de ondas

A Figura 2 ilustra a rosa de ocorrência direcional da totalidade dos dados de altura significativa e período de pico ondas do banco de dados ERA5. A altura significativa varia entre 0,5 e 3,4 m com média de 1,2 m. O período de pico apresenta valores de 3,5 s até 21,3 s e média de 6,3 s. A direção média de ondas mais recorrente é de 108°, variando entre 34° e 212°. Não são identificadas ondas dos quadrantes norte, noroeste e oeste.

As médias de alturas significativas são semelhantes entre os quadrantes nordeste, leste, sudeste e sul. No entanto, o período de pico médio permite agrupar as ondas de nordeste e leste (mais baixos) e as ondas de sudeste e sul (mais altos). As ondas de sudoeste apresentam a maior média de altura significativa apesar de possuírem período de pico médio baixo, semelhante ao dos quadrantes nordeste e leste (Tabela 3). Em termos de probabilidade de ocorrência, aproximadamente 72% do banco de dados é representado por ondas dos quadrantes leste (37%) e sudeste (35%). Em seguida tem-se os

quadrantes nordeste e sul com 16 e 12%, respectivamente. Por fim, o quadrante sudoeste compõe apenas 0,01% do banco de

dados, apesar de apresentar as maiores alturas de ondas.

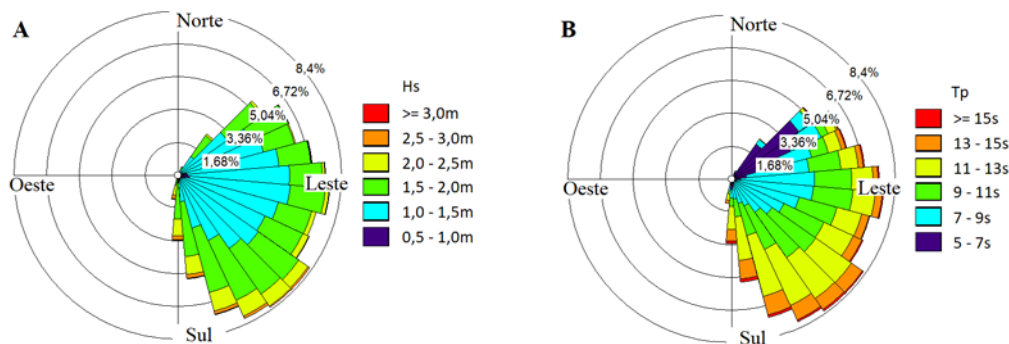


Figura 2. Rosa de ocorrência direcional das ondas do banco de dados ERA5. A) Alturas significativas; B) Períodos de pico de ondas.

Figure 2. ERA5 wave data rose diagram. A) Significant wave height; B) Peak period.

Tabela 3. Médias de altura significativa, período de pico e direção média para ondas características de cada quadrante. A probabilidade de ocorrência representa a quantidade de ocorrências de cada quadrante dividida pela quantidade total de dados.

Table 3. Means of significant wave height, peak period and mean direction for each scenario. The probability of occurrence represents scenarios occurrences divided by the total of data.

Quadrante	Hs Médio (m)	Tp Médio (s)	Direção média (°)	Probabilidade de ocorrência
Norte	-	-	0	0,00
Nordeste	1,3	6,4	45	0,16
Leste	0,9	8,6	90	0,37
Sudeste	1,2	10,0	135	0,35
Sul	1,4	10,5	180	0,12
Sudoeste	1,6	7,9	225	0,0001
Oeste	-	-	270	0,00
Noroeste	-	-	315	0,00

Após a determinação das condições de ondas monocromáticas mais representativas para cada quadrante foi realizada a modelagem de propagação de cada quadrante através do modelo OLUCA-MC. A Figura 3 ilustra os resultados em termos de alturas significativa e vetores de direção e ressalta os setores do arco praial sob convergência ou divergência de ortogonais de ondas devido processo de refração. Posteriormente, visando uma análise quantitativa, obteve-se a

variação energética das ondas entre o ponto de entrada da grade do modelo e a isóbata de 5 m alinhada aos perfis topográficos (Tabela 4). A partir da resultante obtida com base no padrão de todos os perfis, ondas com maiores alturas significativas de sudoeste apresentam 50% de dissipação da energia ao se propagarem sobre a morfologia do leito marinho do litoral. Em seguida dos quadrantes sul e nordeste apresentam reduções de 46% e 38%, respectivamente. Já as ondas de sudeste

e leste, que compõem a maior parte do banco de dados, apresentam incrementos de 32% e 9%. Os perfis 1, 3, 4, 6 e 8 apresentam incremento da energia de ondas de sudeste e os perfis 2, 5 e 6 das ondas de leste. Somente o perfil 6 apresenta incremento da energia de ondas para ambos quadrantes.

A Figura 4 ilustra a amplitude da variação da energia de onda para cada perfil, determinada a partir do produto entre as probabilidades de ocorrência de cada quadrante (Tabela 3) e as variações energéticas das ondas (Tabela 4). Nota-se que os perfis de 7 e 9 apresentam redução da

energia de ondas, tendo seus valores máximos (haste superior) próximos de 0% de variação. A máxima dissipação de energia ocorre nos pontos 7 e 8, atingindo aproximadamente 25% de redução. O perfil 6 apresenta os maiores incrementos da energia de ondas devido à interação das mesmas com o leito marinho, com valor máximo de 130%. De forma geral, os perfis de 1 a 5 apresentam redução da energia de onda. No entanto, observa-se que os terceiros quartis (parte superior da barra) e os valores máximos (haste superior) apontam incrementos da energia de ondas, em especial o perfil 5.

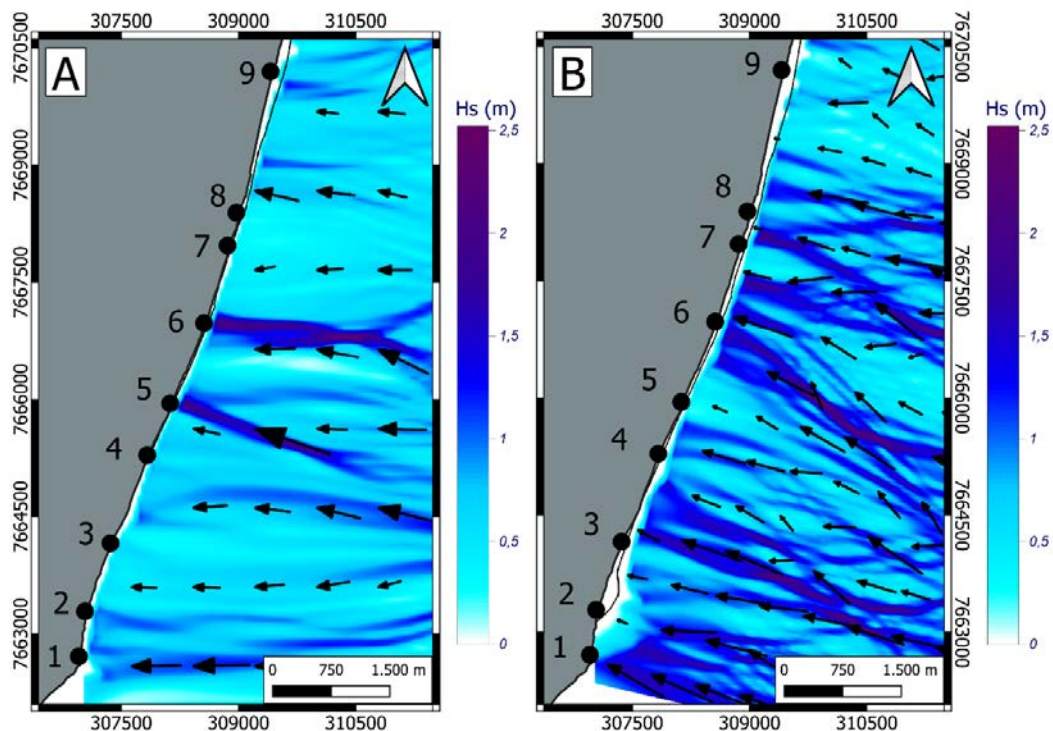


Figura 3. Resultado da propagação de ondas do modelo OLUCA-MC, mostrando as alturas de ondas em cores e vetores de direção das ondas mais representativas para a área de estudo com base no banco de dados ERA5. A) Ondas de leste (37% do banco ERA5); B) Ondas de sudeste (35% do banco ERA5).

Figure 3. Results from OLUCA-MC model presenting wave height (colors) and wave direction (vectors) of the most representative wave conditions at the study area based on ERA5 wave data. A) East waves (37% of the wave data); B) Southeast waves (35% of the wave data).

O mapeamento da variabilidade energética média de ondas de leste e sudeste ao longo da isóbata de 5 m permite identificar setores ao longo do litoral estudado (Figura 5). A Figura 5 apresenta ainda a configuração do leito marinho, destacando a presença de bancos submersos. Do perfil 1 ao 4 a energia de ondas apresenta um padrão de redução, no entanto observam-se aumentos pontuais de

energia associados aos perfis 1 e 3. O trecho entre os perfis 5 e 6 é caracterizado pelo intenso aumento da energia de ondas incidentes. Entre os perfis 7 e 8 nota-se um aumento moderado da energia de ondas. Já no perfil 9 o padrão é de redução da energia das ondas incidentes. De forma geral, a distribuição da energia de ondas ao longo do litoral indica uma relação com a morfologia do

leito marinho. Regiões com presença de bancos submersos apresentam maiores dissipações da energia de ondas (perfis 1 a 4 e

9). Por outro lado, perfis associados a ausência de bancos submersos sofrem incremento da energia de ondas (perfis 5 a 8).

Tabela 4. Variação da energia das ondas de cada cenário com base na diferença de alturas entre a entrada da grade modelada e a isóbata de 5 m alinhada a cada perfil topográfico. Valores em azul indicam dissipação e em vermelho incremento.

Table 4. Variation of wave energy for each scenario based on the wave height difference between the border of the modeled grid and the 5 m isobath, aligned to each topographic profile. Numbers in blue represent decrease and in red represent increase.

Δ Energia de onda por direção de incidência					
Perfil	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste
9	-31%	-50%	-50%	-64%	-44%
8	-23%	-90%	40%	-36%	-38%
7	-46%	-90%	-70%	-86%	-69%
6	-31%	350%	120%	-14%	-25%
5	-62%	280%	-80%	-29%	-19%
4	46%	-50%	70%	-79%	-38%
3	-46%	-70%	30%	-36%	-56%
2	-77%	20%	-60%	-29%	-88%
1	-77%	-15%	80%	-43%	-75%
Balanco	-38%	32%	9%	-46%	-50%

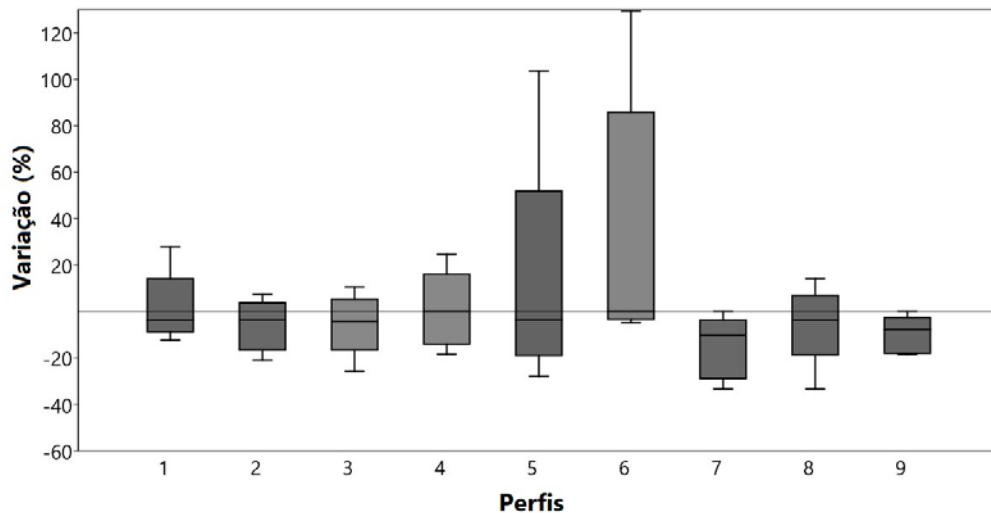


Figura 4. Boxplot da amplitude da variação da energia de ondas probabilística sobre a isóbata de 5 m representando o incremento/redução da energia das ondas modeladas para cada cenário multiplicada por suas respectivas probabilidades de ocorrência. As hastes inferiores (superiores) representam os valores mínimo (máximo), as bases (topos) dos retângulos representam o primeiro (terceiro) quartil e as linhas que cortam os retângulos representam a mediana.

Figure 4. Boxplot of the probabilistic wave energy variation range at the 5 m isobath, representing the increase/reduction of the wave energy modeled for each scenario multiplied by their respective probabilities of occurrence. The lower (upper) bars represent the minimum (maximum) values, the bases (tops) of the rectangles represent the first (third) quartile and the lines that cut the rectangles represent the median.

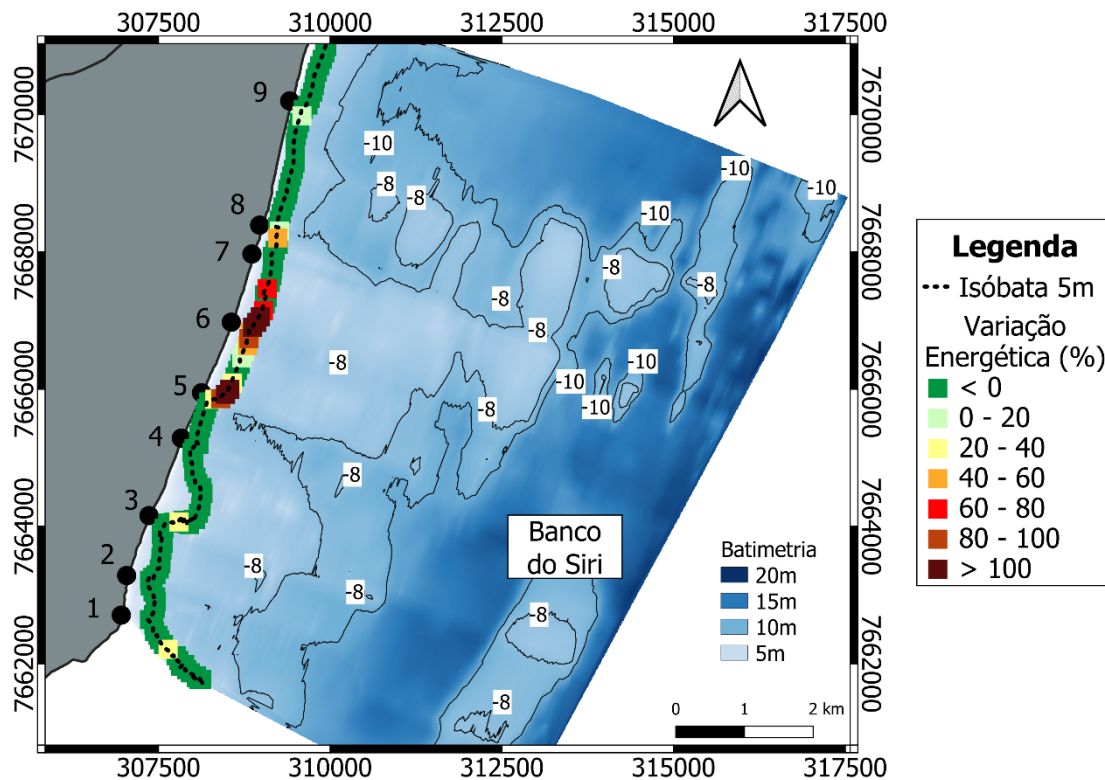


Figura 5. Mapeamento da configuração do leito marinho, destacando a presença de bancos submersos e a variabilidade energética média das ondas de leste e sudeste sobre a isóbata de 5 m.

Figure 5. Averaged energy from east and southeast waves along the 5 m isobathymetric line. Map also highlights the presence of submerged banks.

3.2 Resposta adaptativa dos perfis de praia

As figuras 6, 7 e 8 (A, B e C) apresentam as morfologias médias de cada praia emersa (linhas), calculada a partir de aproximação polinomial dos dados medidos em campo (pontos). Nas figuras 6, 7 e 8 (D, E e F) observam-se as variações das alturas das barreiras, volume da praia emersa ao longo dos campos, bem como os coeficientes de variação (CV) e correlação de Pearson (r) dos mesmos.

Os perfis 3 a 9 apresentam praias associadas a cordões arenosos bem desenvolvidos, já os perfis 1 e 2 que são precedidos por falésias. Em média, a maior altura da barreira e volume da praia emersa se encontram no perfil 9, enquanto os menores

valores estão nos perfis 5 e 7. Os maiores coeficientes de variação de altura da barreira e volume da praia emersa são constatados nos perfis 6 e 3, variando respectivamente 17% e 25%. Já os menores coeficientes de variação de altura da barreira encontram-se nos perfis 1 e 3 (ambos 4%) e do volume da praia emersa no perfil 8 que varia 13%. Os coeficientes de correlação de Pearson (r) apresentam somente valores significativos negativos inferiores a -0,5, representando tendências de redução da altura da barreira (perfis 1 e 6) e perda de volume da praia emersa (perfis de 2 a 4) ao longo do tempo. A correlação mais forte ocorre no perfil 6 para a altura da barreira.

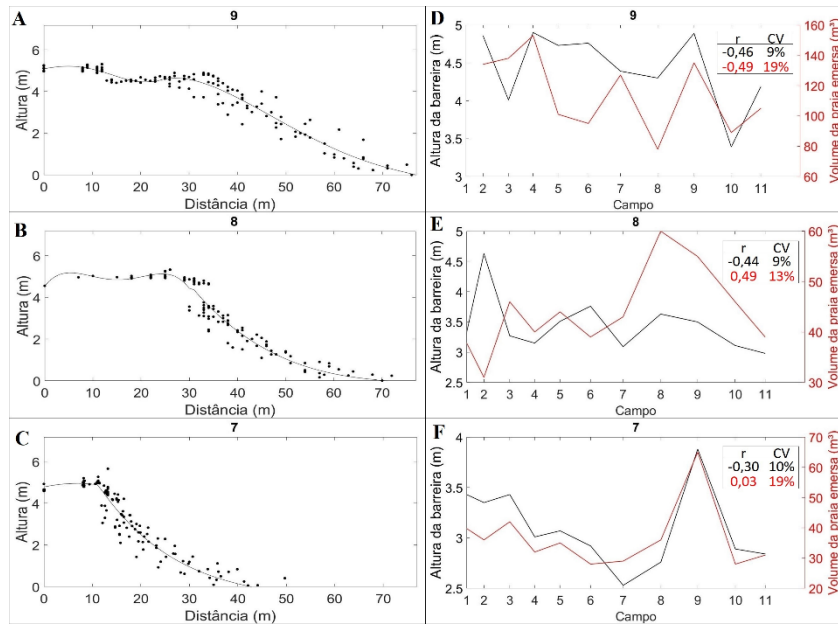


Figura 6. Morfologia e variação dos parâmetros morfológicos dos perfis 9 a 7. A), B) e C) Perfis médios (linhas) e dados medidos com campo (pontos); C), D) e E) Variações das alturas das barreiras (linhas pretas), volumes das praias emersas (linhas vermelhas) ao longo do tempo e seus coeficientes de correlação de Pearson (r) e de variação (CV).

Figure 6. Profiles 9 to 7 shapes and variations of morphologic parameters. A), B) and C) Mean profiles (lines) and altimetry data measured in field (points); D), E and F) Variations of barriers heights (black line), emerged beach volumes (red lines) over time, Pearson correlation coefficients (r) and coefficients of variation (CV).

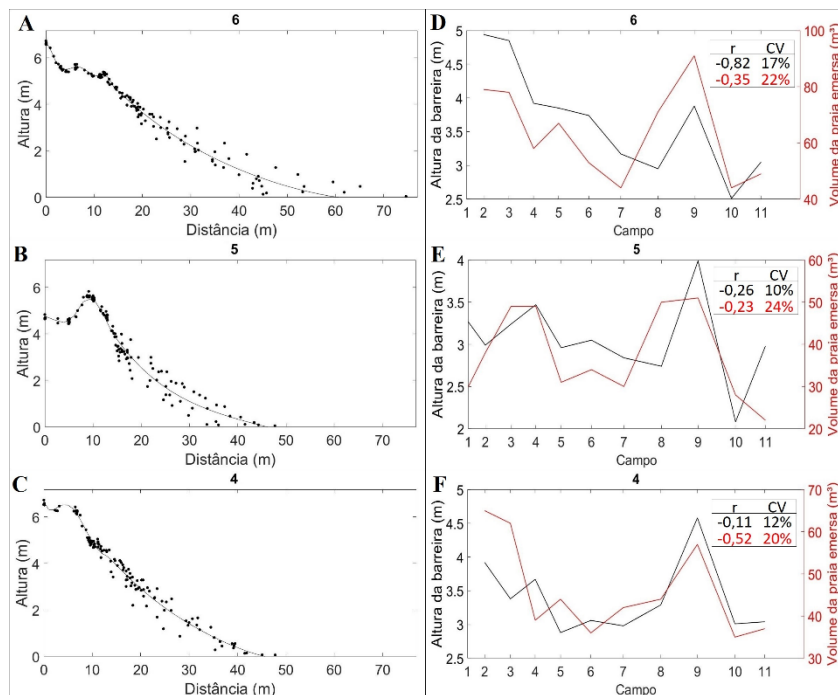


Figura 7. Morfologia e variação dos parâmetros morfológicos dos perfis 6 a 4. A), B) e C) Perfis médios (linhas) e dados medidos com campo (pontos); C), D) e E) Variações das alturas das barreiras (linhas pretas), volumes das praias emersas (linhas vermelhas) ao longo do tempo e seus coeficientes de correlação de Pearson (r) e de variação (CV).

Figure 7. Profiles 6 to 4 shapes and variations of morphologic parameters. A), B) and C) Mean profiles (lines) and altimetry data measured in field (points); D), E and F) Variations of barriers heights (black line), emerged beach volumes (red lines) over time, Pearson correlation coefficients (r) and coefficients of variation (CV).

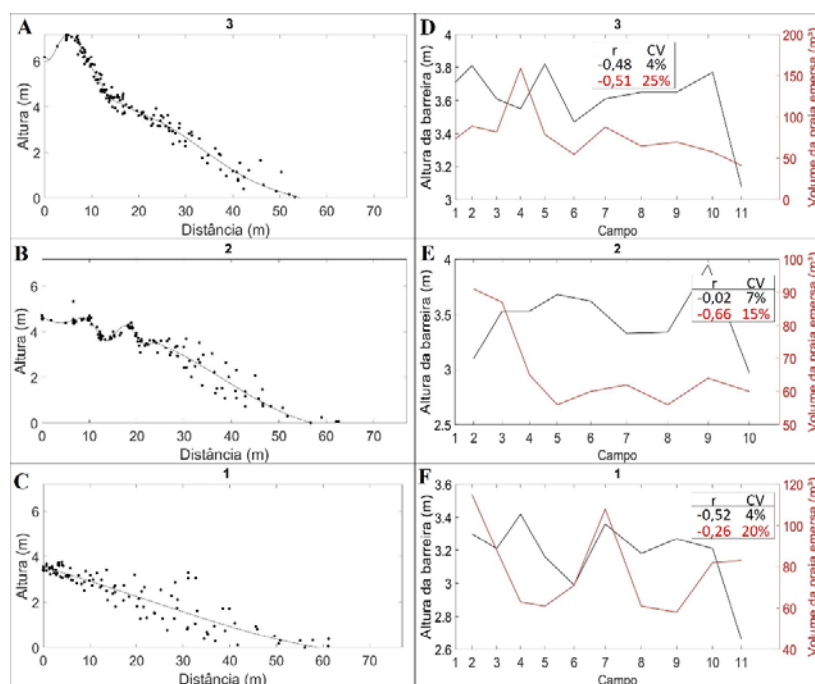


Figura 8. Morfologia e variação dos parâmetros morfológicos dos perfis 3 a 1. A), B) e C) Perfis médios (linhas) e dados medidos com campo (pontos); C), D) e E) Variações das alturas das barreiras (linhas pretas), volumes das praias emersas (linhas vermelhas) ao longo do tempo e seus coeficientes de correlação de Pearson (r) e de variação (CV).

Figure 8. Profiles 3 to 1 shapes and variations of morphologic parameters. A), B) and C) Mean profiles (lines) and altimetry data measured in field (points); D), E and F) Variations of barriers heights (black line), emerged beach volumes (red lines) over time, Pearson correlation coefficients (r) and coefficients of variation (CV).

3.2 Classificação do litoral

A partir do cálculo do CVIn foram definidas classes de grau de exposição às ondas levando em conta a morfologia do perfil de praia e a variabilidade energética das ondas devido a interação com o leito marinho (Tabela 5). A classe de baixo grau de exposição inclui os perfis 2, 7, 8 e 9; representada por valores de CVIn menores do que 0,68 (1º quartil). Os perfis 1, 3 e 4 apresentam CVIn dentro da faixa do 3º quartil, desta forma são classificados como moderado grau de exposição. Por fim, os perfis 5 e 6 são classificados como alto grau de exposição, pois apresentam CVIn acima do 3º quartil (>0,78).

4 Discussão dos resultados

4.1 Climatologia e padrão de energia de ondas

O clima de ondas apresentado reflete o padrão de circulação atmosférica responsável

pela interação com o oceano e a formação de ondas. Discute-se que ondas de leste e nordeste com alturas significativas e períodos de pico baixos, estão associadas às condições de tempo bom sob atuação dos ventos alísios gerados pelo ASAS (Lübbecke *et al.*, 2014; Nogueira *et al.* 2015; Sun *et al.*, 2017). Enquanto ondas dos quadrantes sudeste e sul com maiores períodos de pico e alturas significativas, estão relacionadas às frentes frias associadas a ciclones que se desenvolvem entre 20°S e 57,5°S e migram da costa brasileira em direção ao continente africano (Innocentini *et al.*, 2003; Reboita *et al.*, 2005; Parise, 2009).

Com base em dados do modelo *Global Ocean Wave* (GOW) entre 1948 e 2008, Albino *et al.* (2016a) apresentam a climatologia de ondas em 20 m de profundidade no litoral sul do Espírito Santo (20,8°S, 40,4°O). De acordo com os autores, predominam ondas de leste e sudeste com alturas significativas de 1 a 1,5 m e períodos de pico variando entre 6 e 8 s. As maiores alturas significativas de ondas (>2,5 m) se associam às ondas de sudeste. A

principal discrepância do clima de ondas descrito por Albino *et al.* (2016a) é a não ocorrência de ondas de nordeste, sul e sudoeste, o que pode ser decorrente da utilização de bancos de dados de ondas provenientes de modelos numéricos que adotam premissas diferentes.

Firmino & Bulhões (2020) analisaram características de ondas a partir de dados medidos por boia localizada na costa norte do Espírito Santo (19,9°S x 39,7°O) em uma profundidade de 200 m entre 14/11/2015 e 05/04/2017. Segundo os autores, a maior incidência de ondas ocorre dos quadrantes

nordeste, leste e sudeste com alturas significativas entre 1 e 2 m. O período de pico apresenta valores abaixo de 10 s em 75% das ocorrências medidas e acima de 10 s para 25%. Não há incidência de ondas de norte, oeste e noroeste. As maiores alturas significativas de ondas (>3 m) estão associadas ao quadrante sudoeste. Embora os dados medidos abranjam um intervalo temporal curto em termos de climatologia e se localizem a mais de 150 km de distância da área aqui estudada, é notável a semelhança destes dados com a climatologia descrita no presente estudo.

Tabela 5. Valores normalizados de Altura e volume do perfil praial, redução da altura e do volume do perfil, e aumento da energia de ondas sobre a isóbata de 5m. Os valores de CVIn representam as classes de grau de exposição: em azul baixo grau de exposição (1° quartil), em preto moderado grau de exposição (3° quartil) e em vermelho valores de alto grau de exposição (> 3° quartil).

Table 5. Normalized values of beach height and volume decrease of beach height and volume and increase of wave energy at 5m isobath. CVIn values indicate classes of degree of exposure to incident waves: low exposure in blue (1st quartile), moderate exposure in black (3rd quartile) and high exposure in red (>3rd quartile).

Valores normalizados							
Perfil	Altura da barreira	Volume do perfil	Coef. Pearson Altura da barreira	Coef. Pearson Volume do perfil	Aumento da energia de ondas de leste	Aumento da energia de ondas de sudeste	CVIn
9	0,00	0,00	0,55	0,85	0,09	0,15	0,52
8	0,72	0,91	0,52	0,00	0,00	0,60	0,68
7	0,97	1,00	0,35	0,39	0,00	0,05	0,68
6	0,55	0,66	1,00	0,72	1,00	1,00	0,91
5	1,00	0,99	0,30	0,62	0,84	0,00	0,79
4	0,77	0,88	0,11	0,87	0,09	0,75	0,76
3	0,60	0,47	0,57	0,87	0,05	0,55	0,72
2	0,72	0,62	0,00	1,00	0,25	0,10	0,67
1	0,91	0,46	0,62	0,65	0,17	0,80	0,78

Diversos trabalhos analisaram em escala de detalhe as particularidades de cada setor de um arco praial e mostram que podem ocorrer diferentes níveis de exposição e vulnerabilidades físicas, sendo a resposta da linha de costa uma função do input energético e das características geomorfológicas locais (Albino *et al.*, 2016b; Eguchi & Albino, 2018; Filgueiras & Albino, 2020). Neste sentido, o padrão de variabilidade energética de ondas encontrado ressalta a importância da

avaliação dos processos locais, em especial a dissipação energética das ondas devido à interação com leito marinho. De modo geral, há um consenso de que ondas de sul e sudoeste estão associadas com maiores alturas e energias (Innocentini *et al.*, 2003; Albino *et al.*, 2016a), enquanto ondas de nordeste, comumente estão relacionadas com situações de bom tempo e mar calmo (Nogueira *et al.*, 2015; Albino *et al.*, 2016a). No entanto, o presente estudo mostra que a

morfologia da zona submersa foi responsável por dissipar praticamente metade da energia de ondas oriundas de sul e sudoeste e quase 40% das ondas de nordeste. Por outro lado, para ondas de leste e sudeste há um padrão de incremento da energia de ondas sobre o litoral. Isto desperta um sinal de alerta sobre o litoral, visto que ondas destes quadrantes representam mais de 70% da ocorrência total de ondas. As particularidades das ondas reveladas pelo presente estudo corroboram com a afirmação de que somente uma avaliação regional do banco de ondas e sua análise qualitativa com base propagação de ondas pode não ser suficiente para determinar processos locais, capazes de alterar significativamente a distribuição de energia ondas. Sendo necessária a quantificação da energia ao longo do litoral estudado.

4.2 Grau de exposição

Os perfis 5 e 7 possuem mesmas médias de altura da barreira e volume praias, porém o perfil 5 apresenta maior coeficiente de variação, associado a incrementos de energia de ondas. Já o perfil 7 apresenta menor coeficiente de variação e redução da energia de ondas. Discute-se que maiores mobilidades dos perfis decorrem de maiores variações da energia de ondas, responsáveis pela troca sedimentar entre às zonas emersas e submersas durante a alternância de momentos de alta e baixa energia (Dodet *et al.*, 2019; Eichertopf *et al.*, 2019; Jackson & Short, 2020; Robin *et al.*, 2020; George *et al.*, 2021). O grau de exposição à energia de onda proposto neste estudo também concorda com as tendências de redução da altura da barreira e volume da praia emersa, uma vez que praias expostas às maiores energias de ondas tendem a aplainar seus perfis, reduzindo a altura da barreira e o volume da praia emersa (Masselink & Hughes, 2014).

Filgueiras & Albino (2020) avaliaram a pista de dissipação de ondas a partir da distância da linha de costa até a isóbata de 20 m para classificar a vulnerabilidade do litoral entre os perfis 1 e 6 como moderada à alta, em concordância com os resultados obtidos no presente estudo. Porém, em maior escala de

detalhe, o presente estudo ressalta a influência da morfologia do leito marinho na porção mais rasa da antepraia (~8m) sobre o processo de refração de ondas e consequentemente no padrão de distribuição energética destas ondas ao longo dos perfis de praia. Neste sentido, o trecho entre os perfis 1 e 4 é classificado, através do CVIn, como de moderado grau de exposição, pois apresenta praias relativamente baixas quando comparadas as demais, além de um padrão de redução da altura da barreira e do volume da praia. O controle do grau de exposição neste trecho se dá pela presença do Banco do Siri, que interage com as ondas incidentes e ajuda a amenizar o aumento da energia de ondas sob a isóbata de 5 m. O papel da morfologia do fundo marinho fica mais evidente ao analisar o padrão energético de ondas sobre o perfil 6, o único que apresenta forte tendência de redução da altura da barreira associada ao aumento da energia de ondas de leste e sudeste. Este perfil e o perfil 5 são classificados como de alto grau de exposição, visto que a ausência do Banco do Siri e a proximidade da isóbata de 10 m com a linha de costa podem promover concentração das ortogonais de ondas e desfavorecer a dissipação efetiva das ondas. O elevado valor de CVIn também relacionado com as praias de barreiras baixas, pouco volume. Já o trecho entre os perfis de 7 a 9 é caracterizado pelo CVIn como baixo grau de exposição, visto que apresentam estabilidade da altura da barreira e volume da praia emersa. Além disso, estes perfis estão associados à dissipação da energia de ondas devido à maior distância entre a linha de costa e a isóbata de 8 m e a presença de bancos submersos adjacentes.

Os perfis 5 e 7 destacam a importância de avaliar as particularidades de cada trecho do litoral, visto que possuem morfologias semelhantes, mas dinâmica diferentes.

5 Conclusões

A climatologia de ondas realizada a partir do banco de dados do modelo ERA5 apresenta concordância com estudos prévios que utilizam modelagem e medições de ondas in situ. Além disso, o clima de ondas reflete a atuação dos principais padrões de circulação

atmosférica responsáveis pela formação de ondas na costa sudeste do Brasil.

Ondas associadas a eventos de alta energia podem sofrer redução de seu potencial energético devido a interação com o leito marinho através dos processos de refração, difração e empinamento à medida que se propagam em direção a costa. Bem como ondas relacionadas a eventos de tempo bom podem atingir a costa com alto potencial energético devido à baixa dissipação e/ou concentração de ortogonais decorrente da interação com o leito marinho. Assim, o processo de dissipação energética de ondas sobre a plataforma interna e antepraia ocorre de forma diferenciada para cada direção de incidência, ressaltando o papel da morfologia do fundo e da orientação da linha de costa no grau de exposição da costa às ondas incidentes.

Os setores de um arco praial apresentam diferentes comportamentos. A mobilidade e a tendência dos parâmetros morfológicos dos perfis de praia respondem a energia de ondas que incidem sobre o litoral com maior ou menor intensidade. A metodologia proposta se baseia tanto na estabilidade dos perfis, quanto na variação energética das ondas ao longo do litoral, permitindo avaliar os processos morfodinâmicos locais e assim auxiliar na tomada de decisão frente a possíveis intervenções na linha de costa.

Agradecimentos. Os autores deste trabalho agradecem ao Auxílio nº 88887.145855/2017-00 da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Projeto Universal 421657/2016-2 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Ao Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria (IH-Cantábria) pela disponibilização da ferramenta Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) e ao Centro Europeu Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) pela disponibilização do banco de dados de ondas do modelo ERA5.

Referências

- Albino, J., Girardi, G., & Nascimento, K.A. 2006. Espírito Santo. In: Muehe, Dieter (org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: MMA, p. 227-264.
- Albino, J., Jiménez, J.A., & Oliveira, T.C.A. 2016b. Planform and mobility in the Meaípe-Maimbá embayed beach on the South East coast of Brazil. *Geomorphology*, 253: 110-122.
- Albino, J., Neto, N.C., & Oliveira, T.C.A. 2016a. The Beaches of Espírito Santo. In: Short, A. D., & Klein, A.H.D.F. (Ed.). *Brazilian beach systems*. Springer, p. 333-361.
- Albino, J., Paiva, D., & De Souza Modolo, G.V.M. 2001. Geomorfologia, tipologia, vulnerabilidade erosiva e ocupação urbana das praias do litoral do Espírito Santo, Brasil. *Geografares*, 2: 63-69.
- Bingölbalı, B., Jafali, H., Akpınar, A., & Bekiroğlu, S. 2020. Wave energy potential and variability for the south west coasts of the Black Sea: The WEB-based wave energy atlas. *Renewable Energy*, 154: 136-150.
- Bulhões, E.M.R., Fernandez, G.B., De Oliveira Filho, S. R., Pereira, T.G., & Da Rocha, T.B. 2014. Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 5(2): 155-165.
- Crespo, A.A. 1991. *Estatística*. Saraiva Educação, São Paulo, 224p.
- Da Silva, A.L.C., Gralato, J.D.C.A., Brum, T.C.F., Silvestre, C.P., Da Silva Baptista, É.C., & Pinheiro, A.B. 2020. Dinâmica de praia e susceptibilidade às ondas de tempestades no litoral da ilha grande (ANGRA DOS REIS-RJ). *Journal of Human and Environment of Tropical Bays*, 1: 9-44.
- De Almeida, L.R., Amaro, V. E., Marcelino, A.M.T., & Scudelari, A.C. 2015. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(2): 135-151.
- De Matos, M.F.A., Amaro, V.E., Fortes, C.J., & Scudelari, A.C. 2014. Interação entre ondas oceânicas e fundo marinho:

- resultados na plataforma continental setentrional do rio grande do norte. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(3): 371-391.
- De Souza, T.A., Bulhões, E., & Da Silva Amorim, I.B. 2016. Ondas de tempestade na costa Norte Fluminense. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 6(2): 10-17.
- DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Centro de Hidrografia da Marinha. 2021. *Banco nacional de dados oceanográficos. Previsões de maré*. Disponível em: <http://www.mar.mil.br>. Acesso em: 07 jan. 2021.
- Dodet, G., Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Davidson, M., Floc'h, F. & Suanez, S. 2019. Beach recovery from extreme storm activity during the 2013–14 winter along the Atlantic coast of Europe. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1): 393-401.
- Durán, R., Guillén, J., Ruiz, A., Jiménez, J. A., & Sagristà, E. 2016. Morphological changes, beach inundation and overwash caused by an extreme storm on a low-lying embayed beach bounded by a dune system (NW Mediterranean). *Geomorphology*, 274: 129-142.
- Eguchi, B.M.M., & Albino, J. 2018. Bluff retreat induced by wave action on a tropical beach, in Espírito Santo, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 36(4): 569-580.
- Eichentopf, S., Baldock, T.E., Cáceres, I., Hurther, D., Karunarathna, H., Postacchini, M., ... & Alsina, J. M. 2019. Influence of storm sequencing and beach recovery on sediment transport and beach resilience (RESIST). In: PROCEEDINGS OF THE HYDRALAB+ JOINT USER MEETING, Bucharest, Romania, p. 21-25.
- Figueiredo Filho, D.B., & Silva Junior, J.A. 2009. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18(1): 115-146.
- Filgueiras, G.D.L., & Albino, J. 2020. Vulnerabilidade costeira a partir da abordagem multicritério: estudo de caso no litoral sul do Espírito Santo. *Revista do Departamento de Geografia*, 40: 78-93.
- Firmino, L.A.C., & Bulhões, E.M.R. 2020. Aspectos das ondas oceânicas em áreas de erosão costeira. Litoral do Espírito Santo, Brasil. *Finisterra*, 55(113): 23-44.
- George, E., Lunardi, B., Smith, A., Lehner, J., Wernette, P., & Houser, C. 2021. Storm impact and recovery of a beach-dune system in Prince Edward Island. *Geomorphology*, 384: 1-6.
- Gon, C.J., Macmahon, J.H., Thornton, E.B., & Denny, M. 2020. Wave dissipation by bottom friction on the inner shelf of a rocky shore. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(10): 1-16.
- González, M., Medina, R., Gonzalez-Ondina, J., Osorio, A., Méndez, F. J., & García, E. 2007. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, *SMC. Computers & Geosciences*, 33(7), 916-931.
- Gornitz, V. 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(4), 379-398.
- Hallermeier, R.J. 1981. *Seaward limit of significant sand transport by waves: an annual zonation for seasonal profiles*. Coastal Engineering Research Center Fort Belvoir Va, 23p.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.N. 2018: ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. In: COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S) CLIMATE DATA STORE (CDS). Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu>. Acesso em: 03 fev. 2021.
- Holthuijsen, L.H. 2007. Linear wave theory (oceanic waters). In: Holthuijsen, L.H. (Ed.). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University press, p. 106-142.
- Innocentini, V., Arantes, F.O., & Prado, S.C.C. 2003. Modelo de ondas aplicado ao caso 5-8 de maio de 2001. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 18(01): 97-104.
- Jackson, D.W.T. & Cooper, J.A.G. 2009. Geological control on beach form: accommodation space and contemporary

- dynamics. *Journal of Coastal Research*, (56): 69-72.
- Jackson, D., & Short, A. 2020. *Sandy Beach Morphodynamics*. Ed. Elsevier, 769p.
- Komar, P.D. 1998. *Beach processes and sedimentation*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 544p.
- Li, C.Y., Shih, R.S., & Weng, W.K. 2020. Investigation of Ocean-Wave-Focusing Characteristics Induced by a Submerged Crescent-Shaped Plate for Long-Crested Waves. *Water*, 12(2): 1-17.
- Lins-De-Barros, F.M., Klumb-Oliveira, L., & Lima, R.D.F. 2018. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro (Brasil). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 18(2): 85-102.
- Lübbecke, J.F., Burls, N.J., Reason, C.J., & Mcphaden, M.J. 2014. Variability in the South Atlantic anticyclone and the Atlantic Niño mode. *Journal of Climate*, 27(21): 8135-8150.
- Marcelino, A.M.T., Pinheiro, L.R.D.S.G., & Costa, J.R.S. 2018. Planejamento participativo para a gestão da orla marítima de Galinhos/RN, nordeste brasileiro, com apoio de sensores remotos e modelagem costeira. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 44: 119-139.
- Martin, L., Suguio, K., Flexor, J.M., & Arcanjo, J.D. 1996. Coastal Quaternary formations of the southern part of the State of Espírito Santo (Brazil). In: ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. *Anais...* São Paulo, v. 68, n 3, p. 389-404.
- Masselink, G., Hughes, M., & Knight, J. 2014. *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Routledge.
- Nogueira, I.C.M. 2014. *Caracterização do clima de ondas na bacia do espírito santo através de modelagem numérica*. Rio de Janeiro, 128p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal de Rio de Janeiro/COPPE.
- Padilla-Hernández, R., & Monbaliu, J. 2001. Energy balance of wind waves as a function of the bottom friction formulation. *Coastal Engineering*, 43(2): 131-148.
- Parise, C.K., Calliari, L.J., & Krusche, N. 2009. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3): 175-188.
- Patel, R.P., Nagababu, G., Kumar, S.V.A., Seemanth, M., & Kachhwaha, S. S. 2020. Wave resource assessment and wave energy exploitation along the Indian coast. *Ocean Engineering*, 217: 1-35.
- Poate, T., Masselink, G., Austin, M.J., Dickson, M., & McCall, R. 2018. The role of bed roughness in wave transformation across sloping rock shore platforms. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(1): 97-123.
- Raaijmakers, R., Kryklow, J. & Van Der Veen, A. 2008. Flood risk perceptions and spatial multi-criteria analysis: an exploratory research for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 46: 307-322.
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Santos, F. D., Gomes, A., Hilden, M. & Santini, M. 2011. *Methods for assessing coastal vulnerability to climate change*. ETC CCA technical paper, 1: 1-93.
- Reboita, M.S., Rocha, R.D., & Ambrizzi, T. 2005. Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas. In: CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGIA, 9., 2005, Buenos Aires. *Anais...* Buenos Aires: CONGREMET, 2005.
- Robin, N., Billy, J., Castelle, B., Hesp, P., Laporte-Fauret, Q., Lerma, A. N., ... & Michalet, R. 2020. Beach-dune Recovery from the Extreme 2013-2014 Storms Erosion at Truc Vert Beach, Southwest France: New Insights from Ground-penetrating Radar. *Journal of Coastal Research*, 95: 588-592.
- Rodríguez, M.G., Nicolodi, J.L., Gutiérrez, O.Q., Losada, V.C., & Hermosa, A.E. 2016. Brazilian coastal processes: wind, wave climate and sea level. In: Short, A.D., & Klein, A.H.D.F. (Ed.). *Brazilian beach systems*. Springer, p. 37-66.
- Sallenger, A.H. 2000. Storm impact scale for Barrier Island. *Journal of Coastal Research*, 16: 890-895.

- Silva, I.R., Guimarães, J.K., Bittencourt, A.C., Rodrigues, T.K., & An, G.F. 2017. Avaliação da dinâmica litorânea da região de Baixo/Barra do Itariri, litoral norte do Estado da Bahia, utilizando o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 44(2): 221-234.
- Short, A.D. 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. London, John Wiley, 379p.
- Sun, X., Cook, K.H., & Vizzy, E.K. 2017. The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, 30(9): 3279-3296.
- Trombetta, T.B., Oleinik, P.H., Lopes, B.V., Guimarães, R.C., Marques, W.C., & Isoldi, L.A. 2018. Atenuação da Energia das Ondas sobre uma Rampa que atua como Estrutura de Proteção Costeira na Plataforma Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(4): 1303-1320.
- Viavattene, C., Jimenez, J., Owen, D., Priest, S.J., Parker, D.J., Micou, P., & LY, S. 2015. *Coastal risk assessment framework guidance document*. London, Middlesex University, 156p. (Project Report).
- Yang, Z., García-Medina, G., Wu, W.C., & Wang, T. 2020. Characteristics and variability of the nearshore wave resource on the US West Coast. *Energy*, 203: 1-16.