



## Estudo sobre o impacto do clima de ondas nos processos erosivos da costa do município de Vera Cruz (BA), Brasil.

Laysla Cesar Possebon<sup>1</sup>; Luís Felipe Ferreira de Mendonça<sup>1,6,7</sup>; Rose Ane Pereira de Freitas<sup>4</sup>; Milena Nervino<sup>1</sup>; Danilo Heitor Caires T. B. Melo<sup>2</sup>; Arthur Antônio Machado<sup>1</sup>; Douglas da Silva Lindemann<sup>4</sup>; Rafael Afonso do Nascimento Reis<sup>5</sup>; Carlos Alexandre Domingos Lentini<sup>3,6,7</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Oceanografia – Instituto de Geociências - UFBA, 40.170-110, Salvador, BA, Brasil;

<sup>2</sup>Departamento de geofísica – Instituto de Geociências - UFBA, 40.170-110, Salvador, BA, Brasil (corresponding author.); <sup>3</sup>Departamento de Física da Terra e do Meio Ambiente – Instituto de Física - UFBA, 40.170-115, Salvador, BA, Brasil; <sup>4</sup>Departamento de Meteorologia – Faculdade de Meteorologia – UFPel, 96160-000, Pelotas, RS, Brasil; <sup>5</sup>Departamento de Engenharia Agrícola – UFV, Viçosa, MG, Brasil; <sup>6</sup>Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente (POSPETRO) - UFBA, 40.170-110, Salvador, BA, Brasil; <sup>7</sup>Grupo de Oceanografia Tropical (GOAT);

Artigo recebido em 28/04/2022 e aceito em 22/08/2022

### RESUMO

A erosão praial consiste em um dos principais problemas ambientais em áreas costeiras, sendo as marés meteorológicas e a energia das ondas fatores importantes para a determinação do potencial erosivo em uma região. Os processos de erosão e acreção praial são resultado de um conjunto de interações morfodinâmicas com processos oceânicos e atmosféricos, fazendo com que a linha de costa possa avançar e/ou recuar ao longo do tempo. Neste trabalho analisamos o impacto do clima de ondas nos processos erosivos ocorridos na costa leste do município de Vera Cruz (BA) durante um ano climatológico. Com base em uma análise temporal de dados de vento e ondas para a identificação dos processos energéticos responsáveis pelos eventos erosivos registrados na região. Os resultados revelaram que as principais ocorrências de erosão na costa leste do município estão associadas a eventos sazonais no período de outono-inverno, combinando o cruzamento de frentes frias e marés de sizígia. Estes processos favorecem o aumento do nível médio do mar e, conseqüentemente, a altura das ondas na região, possibilitando um alto potencial destrutivo. O fator ambiental é considerado predominante na ação erosiva, porém os conjuntos de fatores antrópicos como: uso e ocupação do solo e construção de infraestrutura, combinados, favorecem a ocorrência dos eventos erosivos observados. A região costeira do município de Vera Cruz encontra-se em equilíbrio, apresentando mudanças de curto a médio prazo associadas a ações sazonais do campo de ondas (direção e intensidade) e aos regimes de ventos nos diferentes períodos do ano.

Palavras-chave: Erosão costeira, Ondas, Potencial Energético, Vera Cruz.

## Study on the impact of wave climate on erosion processes on the coast of the municipality of Vera Cruz (BA), Brazil.

### ABSTRACT

Beach erosion is one of the main environmental problems in coastal areas. Meteorological tides and wave energy are important factors in determining the erosive potential of a region. The beach erosion and accretion processes are the result of morphodynamic interactions set, with oceanic and atmospheric processes, causing the coastline to advance and/or retreat over time. In this work we analyze the wave climate impact on the erosive processes that occurred on the east coast of Vera Cruz (BA), during a climatological year. Based on a temporal analysis of wind and wave data, to identify the energetic processes responsible for the erosive events recorded in this region. The results show that the main erosion occurrences on the east coast of Vera Cruz are associated with seasonal events in the autumn-winter period, combining the crossing of cold fronts and syzygy tides. These processes favor the increase of the mean sea level and, consequently, the waves height in the region, allowing a high destructive potential. The environmental factor is predominant in the erosive action, however, the sets of anthropic factors such as: land use and occupation and infrastructure construction, combined, favor the occurrence of the observed erosive events. The coastal region of Vera Cruz is in equilibrium, with short to medium term changes associated with seasonal wave field actions (direction and intensity) and wind trends in different periods of the year.

Keywords: Coastal erosion, Waves, Energy Potential, Vera Cruz.

## Introdução

As plataformas continentais do mundo, especialmente as margens de placas passivas, desempenham um papel importante como repositório sedimentar de longo prazo e rotas de transporte entre regiões costeiras (Anthony & Aagaard, 2020). Os ambientes litorâneos são formas de terra altamente dinâmicas dominadas por processos que moldam as características costeiras (Andriolo *et al.*, 2021). As pressões naturais e antropogênicas têm induzido a erosão em cerca de 30% do desenvolvimento costeiro global e as mudanças climáticas aumentam a atenção sobre estas regiões (Vousdoukas *et al.*, 2020). Neste ambiente existem diversos ecossistemas que, muitas vezes, tem sua estabilidade ameaçada por intervenções humanas ou causas naturais associadas a mudanças climáticas (Tessler & Goya, 2005).

Os primeiros processos formadores da linha de costa ocorreram durante todo o período Cenozoico, através do processo de denudação e da tectônica, que determinaram as dimensões da plataforma e o fornecimento de sedimentos (Inman & Nordstrom, 1971; Davie, 1980). Durante o período Quaternário, os ciclos de Milankovitch promoveram a interação entre a geologia e o clima (Caccamo & Magazù, 2021), causando o ajuste isostático. Este processo transgressivo e regressivo de oscilações relativas do nível do mar foi o principal responsável pela forma da linha de costa atual (Martinez, *et al.*, 2017). Existem fortes ciclos de retroalimentação nos sistemas praias, onde a alteração de parâmetros como período, altura da onda ou tamanho do sedimento, podem resultar em um ajuste da linha de costa (Gallop, *et al.*, 2020). Estas variações têm efeito sobre a dinâmica sedimentar atual, regida pelo clima de ondas e de maré (Mishra *et al.*, 2022). Com base nisto, entende-se que os processos dominantes em curta escala de tempo são fundamentalmente oceânicos e atmosféricos, embora a importância das variações interanuais e interdecadais como El Niño Oscilação Sul (ENOS) estejam se tornando cada vez mais evidentes (Webb & Magi, 2022).

Segundo Muehe (2020), a herança geológica do Quaternário e a ação da dinâmica sedimentar contribuem em diferentes escalas espaciais e temporais para a formação da linha de costa. A relação entre o forçamento hidrodinâmico temporal e espacial com as mudanças morfológicas promovem a alteração da linha de costa sob influência direta de processos oceanográficos e meteorológicos locais (Biausque *et al.*, 2022). A frequente ação do mar nas regiões costeiras faz

com que a linha de costa esteja em constante alteração devido a processos morfodinâmicos como erosão, transporte e deposição de sedimentos. O clima de ondas é considerado o principal mecanismo transformador dos processos costeiros a curto e médio prazo (Saprykina *et al.*, 2020). As correntes costeiras transportam os sedimentos suspensos pela ação das ondas, sob influência da deriva litorânea, que está condicionada diretamente ao regime local de ventos (Mishra *et al.*, 2022). Durante o processo de quebra das ondas, a energia dissipada é distribuída a partir do fluxo longitudinal e transversal de água e sedimentos (Oliveira, 2015). Somado a este processo, a variação da maré também causa transformações na linha de costa pelo transporte das correntes de marés, especialmente em locais onde a variação é expressiva (Tessler & Goya, 2005).

Eventos de ressaca (*storm surges*) tendem a alterar a morfologia costeira, na escala de dias, devido as trocas transversais de sedimento (Spicer *et al.*, 2021). Estes eventos ocorrem sob influência da maré astronômica somada a uma maré meteorológica, geralmente associada a sistemas de baixa pressão, acompanhados ou não de frente frias (Von Storch & Woth, 2008). Durante estes eventos, a zona costeira fica exposta a mudanças morfológicas anômalas, que em grande parte dos casos resultam no recuo da linha de costa (Tebaldi, *et al.*, 2012), podendo retornar à posição original caso as condições hidrodinâmicas favoreçam a acreção de sedimentos (Provan *et al.* 2022).

A erosão praias é um dos principais problemas ambientais da zona costeira e apesar de ser um processo natural, acarreta alterações que podem impactar diretamente a sociedade (De Oliveira-Gomes, 2022). A ocupação urbana não planejada tende a não acompanhar o processo natural morfodinâmico, acarretando a aceleração de processos erosivos e/ou acrescivos ao longo da costa. Ao longo do litoral nordeste brasileiro existem inúmeros registros de praias com processos erosivos (Sousa *et al.*, 2006; Scudeleri *et al.*, 2005; De Gois & Niédja, 2010; De Souza Medeiros, 2014; Nervino & Klammer, 2020), onde grande parte destes processos são resultado do conflito entre as áreas antrópicas e fenômenos naturais associados a morfodinâmica local e o aporte sedimentar. Este processo pode ser agravado por obras de engenharias como estabilização de canais de maré, canais de acesso e estruturas de abrigos a terminais marítimos e espigões construídos sem um entendimento prévio dos processos costeiros locais (Neves & Muehe, 2008).

O impacto mais visível na costa brasileira é a construção de estruturas urbanas rígidas que alteram a dinâmica sedimentar (Tessler & Goya, 2005).

No estado da Bahia, parte da linha de costa encontra-se em equilíbrio, apresentando modificações sazonais em decorrência de eventos extremos, responsáveis pela maioria dos processos erosivos locais (Nervino & Klammer, 2020). No município de Salvador, Bittencourt *et al.* (2008) identificaram através de registro bibliográficos a ocorrência de 31 eventos severos de erosão ao longo da orla no período de 1965-2006 (41 anos). Estes eventos foram responsáveis por prejuízos econômicos e sociais. Dutra (2014) verificou que 65% da orla oceânica de Salvador já passou por episódios erosivos e a ocorrência destes eventos está relacionada, principalmente, a ventos associados a passagem de sistemas frontais e ciclones na região do atlântico sudoeste, que tendem a gerar ventos e ondas do quadrante sul e sudeste.

O primeiro estudo aprofundado de análise da linha de costa na Ilha de Itaparica foi realizado por Nascimento (2012). Este autor analisa a sensibilidade da costa leste da ilha a ocorrência de processos erosivos e observou que a maior parte do trecho se apresentava em equilíbrio, 24% em progradação e somente 17% da linha de costa encontrava-se em erosão. Dentre os agentes alteradores da morfologia costeira na ilha de Itaparica temos o padrão de incidência de ondas, alteração na morfologia dos recifes de corais de franja, atenuação das correntes de maré, dinâmica do delta de maré vazante e processos antrópicos, que em conjunto determinam seu comportamento. Segundo Silva *et al.* (2001), o principal agente controlador para a ação das ondas em praias do litoral baiano são a presença de recifes de coral ao longo da costa. Efetivamente, os recifes atuam como barreiras e ou pontos de difração e refração das ondas, podendo potencializar sua ação em regiões específicas, causando um rápido processo erosivo (Da Silva *et al.*, 2020). De acordo com a direção predominante do campo de vento a faixa de

praia é modelada conforme as ondas atingem a costa e pela distribuição de energia ao longo do tempo.

Diante dos riscos de erosão costeira previstos para aumentarem globalmente nas próximas décadas, conhecer dinâmica e fisiograficamente o litoral de núcleos urbanos como a Baía de Todos os Santos, torna-se fundamental para tomada de decisões estratégias de mitigação e controle dos processos erosivos futuros. Desta forma, acreditamos que estudos que busquem conhecer os padrões oceanográficos, geológicos e meteorológicos que atuam no retrabalhamento da linha de costa e seu comportamento migratório ao longo do tempo são de extrema importância, tanto para os projetos de engenharia como de gerenciamento costeiro. Visto, o presente trabalho tem por objetivo caracterizar sazonalmente a climatologia de ondas e deriva litorânea sedimentar através do seu potencial erosivo nas praias da margem leste do município de Vera Cruz (BA). Analisamos os valores sazonais dos parâmetros de altura, período, direção e potencial energético em 6 pontos de maior erosão na costa leste de Vera Cruz (BA) e como a deriva litorânea, associada ao regime médio de ventos influencia no transporte lateral de sedimentos.

## Material e métodos

### Localização da área de estudo

O município de Vera Cruz está localizado na metade centro-sul da Ilha de Itaparica, banhado pela Baía de Todos os Santos (BTS), localizando-se a uma latitude 12° 57' 32" Sul e a uma longitude 38° 36' 16" Oeste, conforme a Figura 1. A Ilha de Itaparica é uma das maiores ilhas marítimas do país, abrangendo cerca de 239 km<sup>2</sup>, com aproximadamente 104 km de costa e contra costa. Além de ser a maior entre as 56 ilhas presentes na BTS, está dividida em dois municípios: Vera Cruz e Itaparica.

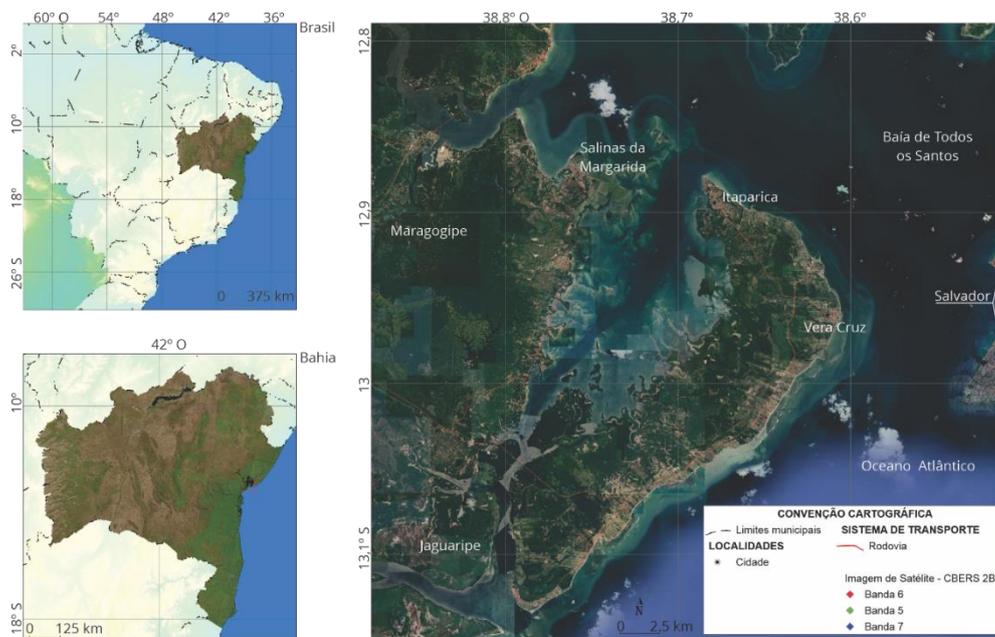


Figura 1 - Localização da área de estudo do município de Vera Cruz, Ilha de Itaparica – BA.

### Caracterização meteorológica e oceanográfica

A costa leste do Nordeste brasileiro apresenta um clima tropical úmido, típico da região equatorial, com ciclo sazonal associado às distribuições médias anuais de temperatura, precipitação e evaporação. As médias anuais de temperatura, precipitação e evaporação correspondem a de 25,2 °C, 2.100 mm e 1.002 mm, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Devido a maior incidência solar no hemisfério Sul durante os meses de janeiro, fevereiro e março ocorrem as máximas de temperatura (~ 30 °C) na BTS, já as temperaturas mínimas (~ 21 °C) ocorrem entre os meses de julho, agosto e setembro e estão associadas a entradas de frentes subtropicais provenientes da região sul/sudeste e baixa incidência solar (Lessa *et al.*, 2009). O período mais seco corresponde janeiro e setembro quando a propagação de frentes frias é inibida pela intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Sul e à presença de vórtices ciclônicos de altos níveis da troposfera, caracterizando uma baixa precipitação (Tanajura *et al.*, 2010). O litoral baiano está localizado dentro do cinturão dos ventos alísios do Atlântico Sul (NE-E-SE) associado a célula de alta pressão que ocorre na região (Servian *et al.* 1996). A Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é considerada semipermanente, pois varia sazonalmente, deslocando-se zonalmente e influenciando o clima de ventos no litoral leste brasileiro (Mendonça *et al.*, 2017). Os ventos no litoral baiano são

controlados pela ação da ASAS e pelo avanço da sistemas frontais pela parte sul da América do Sul (Bittencourt *et al.* 2018). Sendo predominantemente regido por ventos de leste e nordeste durante a primavera-verão e ventos de sul, sudeste no período outono-inverno (Bittencourt *et al.*, 2000). Os ventos sul e sudeste são gerados durante o período de outono-inverno, pela passagem de sistemas frontais que costumam desencadear frentes subtropicais que chegam ao litoral da Bahia. Mesmo com baixa frequência, os ventos de sul e sudeste são mais fortes e atingem uma velocidade média de 5 m/s, segundo dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Estes ventos possuem impacto direto no clima de ondas da região e estão diretamente associados aos processos erosivos mais intensos no litoral da Bahia.

A circulação oceânica de larga escala no Atlântico Sul é influenciada pelo giro subtropical anticiclônico, que acompanha a ASAS, e é limitada meridionalmente pela parte inferior da Corrente do Atlântico Sul e superior da Corrente Sul Equatorial (Stramma & England, 1999). A camada superficial de águas tropicais flui ao longo da costa brasileira através da Corrente do Brasil (CB). Esta corrente é proveniente da Corrente Sul Equatorial (CSE), que se bifurca ao aproximar-se da costa brasileira, derivando para sul até 35-40°S, onde se encontra com a corrente das Malvinas, na região de gradiente termohalino denominada Confluência Brasil-Malvinas (CBM). Ao se afastar da costa na região da CBM a CB passa a ser chamada de

Corrente do Atlântico Sul e flui para leste até próximo ao continente africano (Figura 2), fechando o giro subtropical do Atlântico Sul junto a linha do Equador (Peterson & Stramma, 1991; Silveira, 2000; Cirano *et al.*, 2006).

A estrutura termohalina das águas do litoral da Bahia são caracterizadas por: uma massa d'água Tropical (AT) quente e salina, que flui para sudoeste nos primeiros 200 metros da camada superficial, com temperaturas superiores a 20°C e salinidade maiores que 36,40; uma massa d'água fria que flui para sul ao longo da camada inferior (200 – 500m), chamada de Água do Atlântico Sul (ACAS) com temperaturas inferiores a 20°C e salinidade menor que 36,40 (Castro & Miranda, 1998). A massa de água localizada abaixo da ACAS é a Água Intermediária Antártica (AIA) que se move na direção ao Equador a partir de 25°S, com temperaturas de 3-6°C e salinidade 34,2-34,6

(Muller *et al.*, 1998; Cirano *et al.*, 2006). Sobre a plataforma continental baiana a circulação é fortemente influenciada pelo padrão sazonal dos ventos que atingem à costa. Durante os meses de primavera-verão as correntes médias superficiais paralelas a costa flui para sudoeste, acompanhando os ventos de leste/nordeste, enquanto nos meses de inverno, durante a influência dos ventos de sul/sudeste o sentido da corrente é norte/noroeste (Amorim *et al.*, 2013; Brandão, 2019). Segundo Castro & Miranda (1998), na maioria do ano o fluxo de água na plataforma continental nordeste baiana e do Brasil é direcionado para sudoeste, com exceção dos meses de junho, julho e agosto onde os ventos de sudeste se tornam mais intensos e alteram o padrão médio de circulação.

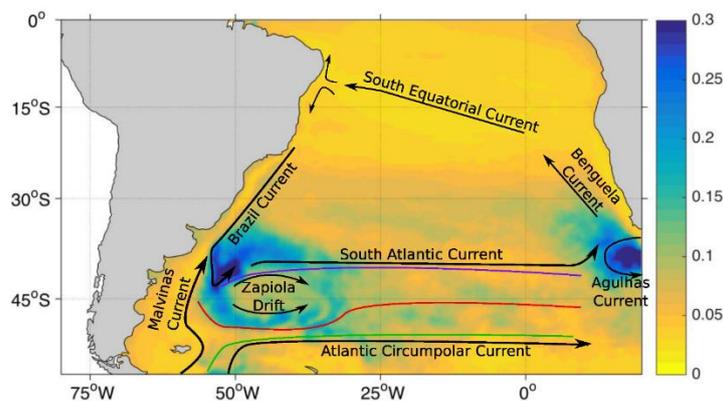


Figura 2 - Representação esquemática do Giro Subtropical e a circulação do Oceano Atlântico Sul. Fonte: Ruiz-Etcheverry & Saraceno (2020).

O padrão de ondas na costa é modulado pelos ventos incidentes na região. Durante o período de março a setembro, os trens de onda predominantes são de leste-nordeste, apresentando uma altura média de 1 m e taxa média de potência ~6 kW/m (Guimarães *et al.*, 2019). No período de abril a agosto, predomina a direção sul-sudeste e sudeste, com ondas atingindo alturas em torno de 1,5 metros e velocidades superiores a 10 cm.s<sup>-1</sup> (Bittencourt *et al.*, 2005). Este padrão sazonal do clima de ondas pode ser alterado por processos sinóticos atmosféricos, como *El Niño* e *La Niña*, que podem causar a interrupção da ação dos ventos de SSE nessa região (Nascimento, 2012). O regime de marés próximo a ilha de Itaparica é considerado semi-diurno, com ciclos alternados de vazante e enchente ao longo de um período de 24 horas. Dutra *et al.* (2017) observou que a costa do município de Salvador (BA) apresenta alturas

média de 2,5m sob marés de sizígia, enquanto no interior da BTS, Cirano & Lessa (2007) verificaram variações de 1,86 a 2,94m. Ainda de acordo com estes autores a circulação oceânica na BTS e adjacências sofre variações sazonais, apresentando dois padrões distintos: com uma corrente para sudoeste (SW) na estação seca e uma corrente para nordeste (NE) durante a estação chuvosa.

### Análise da linha de costa

Com base no levantamento bibliográfico realizado pelos autores, observamos que o registro de ocorrência de processos erosivos nos municípios de Salvador e Vera Cruz aumentaram no período de janeiro 2015 a dezembro de 2018. Estes dados foram fundamentais pois documentam e possibilitaram a obtenção da data de maior ocorrência dos eventos erosivos, assim como a

localização e a possibilidade de prejuízos econômicos. As datas de ocorrência possibilitaram correlacionar os dados oceanográficos e meteorológicos para auxiliar no objetivo de compreender como as condições dinâmicas influenciam nos processos erosivos locais na costa leste de Vera Cruz (BA).

### Extração dos dados de oceanográficos e meteorológicos

Os dados de ondas utilizados neste trabalho foram obtidos através do portal Rede Ondas (2021), disponibilizados de forma aberta e gratuita. Foram utilizadas as médias sazonais de uma série temporal de quatro anos (2015-2018) das variáveis altura (Hs), período de pico (Tp) e direção (Dp) das ondas. Estes dados foram coletados através de um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) Work Horse Sentinel de 600 kHz, com medidor de onda direcional - *Waves Array* acoplado, da marca *Teledyne RD Instruments*. O equipamento está fundeado a 5 km da costa de Praia do Forte (BA), a uma profundidade de 32 metros, onde são realizadas medições no intervalo de 3 horas a uma frequência de 2 Hz. Os dados de vento foram extraídos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), através da estação meteorológica automática A438 localizada em Marau – BA. Foram analisados os dados de direção e intensidade do vento, nos quais foram extraídos valores sazonais médios de uma série temporal de 10 anos (2008-2018). Esta estação foi escolhida devido a sua proximidade com a área de estudo e sofrer turbulência por obstáculos como a Estação de Salvador – BA.

O processamento dos dados foi feito através do software Matlab © 2016, onde foram confeccionados os gráficos da série temporal completa das variáveis altura, período de pico, direção e potencial energético das ondas, assim como os gráficos sazonais de vento. A série passou por um processamento de controle de qualidade estatístico para a eliminação dos dados espúrios e os resultados foram separados sazonalmente por: verão, outono, inverno e primavera. A análise sazonal busca caracterizar os dados de direção de corrente e altura de onda de acordo com o padrão médio de ventos ao longo do ano. Posteriormente, foram gerados os gráficos de distribuição de frequência para os parâmetros de altura e período de pico. Também foram gerados os diagramas de rosa dos ventos para análise dos campos onda sazonal.

### Cálculo do potencial energético das ondas

Com objetivo de analisar o potencial impacto das ondas nos 6 pontos de maiores taxas de erosão na costa leste de Vera Cruz (BA) foram calculados os valores densidade média energética total ( $E_T$ ) para ondas de gravidade, conforme a equação abaixo:

$$E_T = E_C + E_P = \frac{1}{2} \rho g a^2 \text{ (Nm.m}^{-2}\text{)} \quad (01)$$

Sendo  $E_C$  a energia cinética (Nm.m<sup>-2</sup>),  $E_P$  a energia potencial (Nm.m<sup>-2</sup>),  $\rho$  a densidade da água do mar,  $g$  a gravidade e  $a$  é considerado a amplitude (m).

A taxa de energia propagada por unidade de comprimento da crista através de um plano vertical perpendicular a direção de propagação da onda é denominada fluxo médio de energia (P) obtido através da equação:

$$P = E_T \cdot C_g \quad (02)$$

Sabendo que a velocidade de propagação é dada por  $C_g = \frac{gT}{4\pi}$ . Assim, o fluxo médio (P) para ondas monocromáticas é calculado por:

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \quad (03)$$

O fluxo de energia para um mar real, modelado através de um processo aleatório e resultado da sobreposição de componentes monocromáticas é calculado através da equação:

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \iint_0^{2\pi} S(f, \theta) f^{-1} df d\theta \quad (04)$$

Onde  $S(f, \theta)$  é a distribuição de densidade de energia em termos de frequência e direção.

Os parâmetros estatísticos mais utilizados foram a altura significativa (Hs) e o período médio de energia (Te). Esses parâmetros foram utilizados para calcular os valores de energia potencial das ondas na região de Vera Cruz para as quatro estações do ano. A equação 05, expressa em potência por unidade de comprimento da crista (Assis, 2010; Nunes, 2018) e descrita abaixo:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e = 0,4906 H_s^2 T_e \text{ (Kw.m}^{-1}\text{)} \quad (05)$$

A dispersão de sedimentos na linha de costa foi determinada pela intensidade e distribuição da energia de ondas e sua interação com o fundo marinho. Com o objetivo de compreender a dinâmica do transporte na costa leste do município de Vera Cruz (BA), foram escolhidos seis pontos representativos de cada trecho de erosão da linha descrito por Nascimento (2012). Desta forma, para cada trecho de praia onde foram identificados processos erosivos retirou-se um ponto representativo. Para estas áreas, calculou-se a intensidade potencial da deriva litorânea, através do método descrito por Bittencourt *et al.* (2000, 2002, 2003). Assim, a intensidade foi determinada a partir da Equação 06:

$$X = \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot H^2 \quad (06)$$

onde  $\alpha$  é o ângulo formando entre a frente de onda e a linha de costa, e H é a altura da onda ao longo da linha de costa (Bittencourt *et al.* 2005).

O ângulo  $\alpha$  das ondas que incidem na costa foi estimado a partir da interação entre o ângulo da linha de costa e o ângulo das ondas mais frequentes que incidem na região (água profunda). O valor obtido é multiplicado pela porcentagem da frequência anual da direção do vento para as diferentes das frentes-de-onda. Para a análise da direção da ondulação incidente na costa e o sentido do transporte de sedimento na região estudada confeccionamos dois mapas sazonais: primavera/verão e outono/inverno, através do software *QuantumGIS (versão 3.12.1)*. Utilizando como base os dados de alta resolução DigitalGlobe do sistema *Google Earth* para o período analisado.

## Resultados e discussão

As linhas de costa dominadas por ondas possuem alta energia e sofrem processos erosivos em diferentes escalas espaço-temporais. Em geral, as praias de mar aberto mobilizam três vezes mais sedimentos do que praias de embaiamento, nas quais apresentam processos erosivos e acrescivos mais lentos. Na costa leste de Itaparica, Nascimento (2012) analisou a morfodinâmica de praia ao longo de 50 anos e identificou cinco trechos com tendência a erosão. Destes, 17% da

linha de costa foi caracterizada sob influência de processos erosivos, 24% apresentaram progradação e 59% da linha de costa esteve sob equilíbrio. Porém, com os riscos de erosão costeira previstos para aumentar globalmente, a obtenção de dados detalhados para a tomada de decisões estratégicas de mitigação e controle da erosão estão se tornando fundamentais (Pucino *et al.*, 2021). Desta forma, buscamos analisar estas áreas pré-definidas de ocorrência de processos erosivos, a fim de aprofundar o estudo de correlação com as componentes oceanográficas e meteorológicas.

A constante alteração da linha de costa não pode ser compreendida de forma isolada e as forçantes oceanográficas são importantes condicionantes no transporte sedimentar, além de correlacionar-se com às condições atmosféricas dominantes (Peduzzi *et al.*, 2022). Os fatores atmosféricos atuam com maior importância nos períodos de curto e médio prazo, atuando no clima de ondas e conseqüentemente nas correntes costeiras. É importante explicar que as ondas possuem um papel relevante na hidrodinâmica local como processo motriz para a erosão costeira e outros processos morfodinâmicos (Vousdoukas *et al.*, 2020).

Durante os períodos de outono e inverno ocorre o avanço das frentes frias sobre a região sul e sudeste do Brasil, gerando ventos predominantes do quadrante sul-sudeste em nossa região de estudo. A sazonalidade apresenta características atmosféricas específicas e gera respostas imediatas no padrão das ondas e correntes costeiras, assim como no transporte sedimentar (Fernandez-Fernandez *et al.*, 2020). A intensificação dos ventos de sul direciona a entrada dos trens de onda gerados em alto mar, diretamente na costa leste do município de Vera Cruz. Causando um aumento 3 vezes maior nas velocidades das correntes costeiras e transporte sedimentar (Purkiani *et al.*, 2020).

Na ocorrência de grandes tempestades, próximas à região de estudo, pode haver alterações significativas nos perfis praias poucas horas após o início do evento atmosférico (Cabral & Castro, 2022). Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED - 2012), o município de Vera Cruz registrou três grandes ocorrências de eventos erosivos nos anos de 2010, 2011 e 2012. Nestes eventos houve o recuo da linha de costa e a derrubada de construções urbanas. Em nosso estudo, o mês de maio apresentou a maior frequência de eventos erosivos, enquanto os meses de junho, agosto e setembro registraram apenas um evento erosivo cada mês. Através da busca por ocorrência de eventos erosivos em referências

bibliográficas e reportagens, identificamos cinco grandes eventos, conforme a Tabela 1. Todos os eventos erosivos registraram prejuízos econômicos como a destruição parcial da linha de costa, barracas de praia e casas.

Tabela 1 - Eventos erosivos no município de Vera Cruz - BA.

EVENTOS EROSIVOS	PREJUÍZOS
1 31/05/2015	Destruição da estrutura de imóveis, bem como afastamento de moradores e veranistas
2 28/06/2017	Destruição do cais
3 07/05/2018	Destruição de barracas de praia e construções antigas
4 14/09/2018	Destruição de casas
5 05/08/2019	Destruição de casas

Os dados de direção e altura de onda previstos e registrados para o dia dos eventos erosivos são apresentados na Tabela 3. Com alturas de onda previstas variando entre 1,70 e 2,00 m, durante a ocorrência da tempestade oceânica os valores observados variaram entre 1,48 e 2,30 m, cerca de 15% a mais que o previsto. A direção predominante foi de leste-sudeste (ESE) e gerou trem de ondas energético que atuou transversalmente a costa leste de Vera Cruz, o que produziu uma aceleração nos processos erosivos locais. Os resultados observados se assemelham aos descritos anteriormente por Dutra (2008) para as praias e orla de Salvador, no qual a posição da linha de costa favorece a entrada de ondas transversais a costa nas direções leste-sudeste, sudeste, sul-sudeste e sul.

Tabela 2 - Dados de altura prevista/observada e direção de onda, registrados pela Marinha do Brasil para a região de Salvador para os dias de eventos erosivos.

DATA DO EVENTO	ALTURA PREVISTA	ALTURA OBSERVADA	DIREÇÃO
31/05/2015	2,20	-	-
28/06/2017	2,20	2,30	122°
07/05/2018	1,70	1,95	117°
14/09/2018	2,00	1,48	119°
06/08/2019	2,00	-	-

Dentre os processos naturais, as ondas oceânicas transportam parte da energia transferida da atmosfera para a superfície do mar por longas distâncias e em conjunto com as marés e correntes litorâneas aceleram o processo erosivo (Jaramillo-Torres *et al.*, 2020). O litoral baiano é dominado por ondas do tipo *sea*, que atingem a costa na maior parte do ano. Estas ondas são resultado dos ventos predominantes de leste e o avanço de frente oceânicas na região (Pereira *et al.*, 2020). A definição deste clima de ondas nos permite a identificação da variação dos níveis de energia ao longo do ano, assim como seu potencial modificador na linha de costa. A análise das séries temporais de altura significativa, período de pico e a direção das ondas são mostrados na Figura 3. Estes dados indicam uma oscilação sazonal na altura e período das ondas sem o vetor de direção. Durante os meses analisados a altura significativa, período de pico e a direção das ondas variaram entre 0,47 a 4,04 m, 2,9 a 18,1s e direção nordeste a oeste-noroeste (37-288 graus). Segundo Firmino & Bulhões (2020) os maiores períodos estão associados as maiores alturas de onda com direção transversal a linha de costa e conseqüentemente, maior potencial energético para erosão.

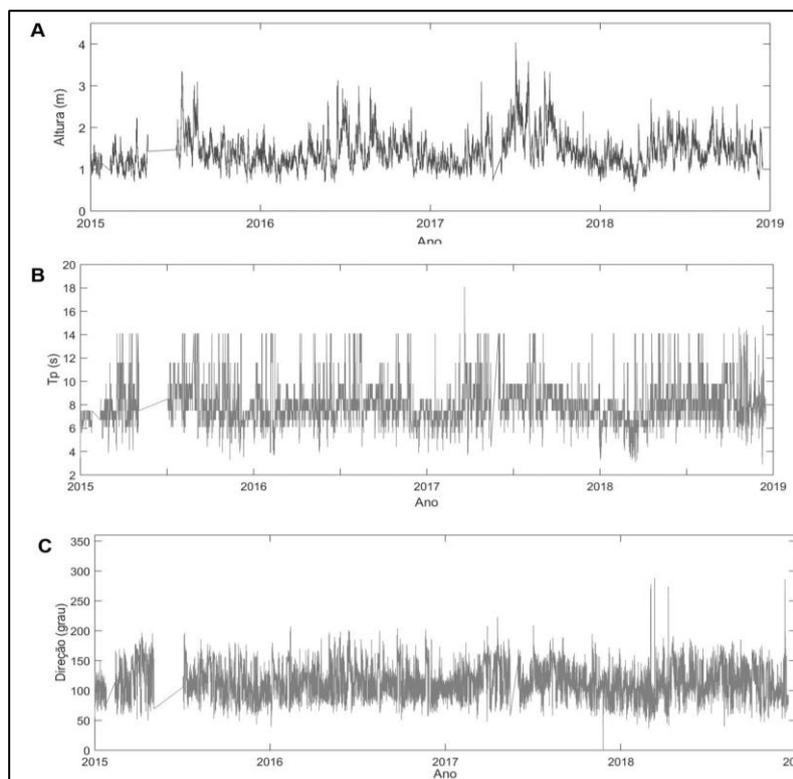


Figura 3 - Série temporal dos parâmetros de onda para os anos de 2015 a 2018. A) Altura, B) Período e C) Direção.

Os valores médios da direção de onda gerados com dados de modelagem numérica para a costa leste do município de Vera Cruz, ao longo dos quatro anos analisados, indicam a predominância nas direções de sul-sudeste (S) a leste-nordeste (ENE) (160-67,5 graus). Na Figura 4, observamos que durante o outono/inverno as ondas de leste-sudeste (ESE) e sudeste (SE) atingem a região mais ao sul da ilha de Itaparica, com frequências inferiores a 0,12s, altura entre 1,5-2 m, período de pico de 9-12s, e direção entre leste-sudeste e sul. Durante o outono eventos de sudeste geraram um aumento significativo nas ondas entre 1,5 e 3m, que possivelmente alteraram a granulometria e a estrutura sedimentar das praias

do leste e sul de Vera Cruz. Nesta época do ano, a variação zonal da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) para leste, associada com o surgimento de frentes frias no sudeste brasileiro, aumentam a altura significativa com períodos superiores a 10 segundos (Figura 5B) (Kousky, 1979). Ventos mais intensos podem gerar ondas capazes de produzir modificações na linha de costa, além de transportar os sedimentos no pós-praia e áreas de dunas. Andrade (2005) observou que estes sistemas apresentam maiores frequências no inverno totalizando aproximadamente 10 ocorrências, 8 para primavera e outono e apenas 4 ocorrências para o verão.

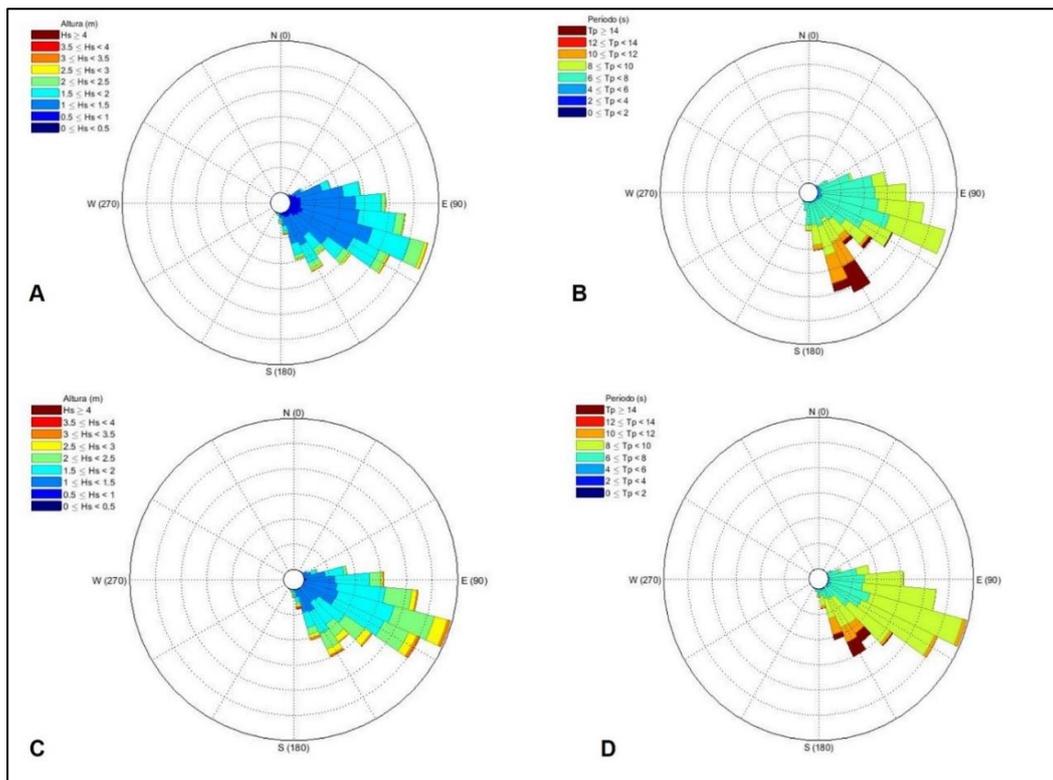


Figura 4 - Rosa de onda da altura significativa e do período de pico para o período de outono e inverno. A e B) Altura significativa e período de pico para o outono e C e D) Altura significativa e período de pico para o inverno.

A Figura 5D exemplifica o aumento das ondas associadas a passagem de sistemas frontais no litoral sudeste brasileira, intensificando os ventos de quadrante sudeste na costa baiana, conforme descrito anteriormente por Dominguez *et al.* (1992). Os ventos de leste e sudeste induzem a formação de ondas oceânicas que chegam ao litoral leste de Vera Cruz com potencial energético acima da média anual. Devido à alta amplitude e longos períodos, estas ondas apresentam uma maior capacidade de remobilização de sedimento e um transporte lateral de centenas de metros cúbicos de areia.

Na primavera (Figura 5 A, B) observamos a predominância de ondas de Leste com altura entre 0,5 e 1,5 m, com períodos entre 6-8 segundos, com algumas ocorrências de ondas maiores de sudeste, superiores a 3m, associadas a períodos de formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Apesar de poucas observações para as ondas de sul-sudeste, são estas que apresentaram os maiores valores de altura significativa. Durante o verão (Figura 5 C, D), o deslocamento zonal do

centro da Alta Subtropical do Atlântico Sul está mais próximo da África, causando a intensificação dos ventos do quadrante nordeste na costa leste brasileira (Degola, 2013). Segundo Andrade (2005), nesta época do ano o deslocamento dos sistemas frontais é desviado para o oceano ao atingir as regiões sul e sudeste do país, diminuindo assim a frequência de frentes em latitudes baixas. Em virtude disto, ondas de menor tamanho, com períodos de 6-8s, tendem a gerar perfis acrescidos (Calliari *et al.*, 2003), em nossa região de estudo podemos observar que sob estas condições o regime de maré tende a ser predominante no transporte sedimentar local. Segundo Muehe (2005), os ambientes de mesomaré tem a mobilidade dos sedimentos praias alterada com a ação local das ondas e a variação da maré, gerando diferentes perfis morfodinâmico na porção superior e inferior da praia. Desta forma diferentes processos locais de transporte sedimentar como ondas incidentes, ondas de borda, surf beats e correntes de marés são frequentemente observados na região de estudo (Calliari *et al.*, 2003).

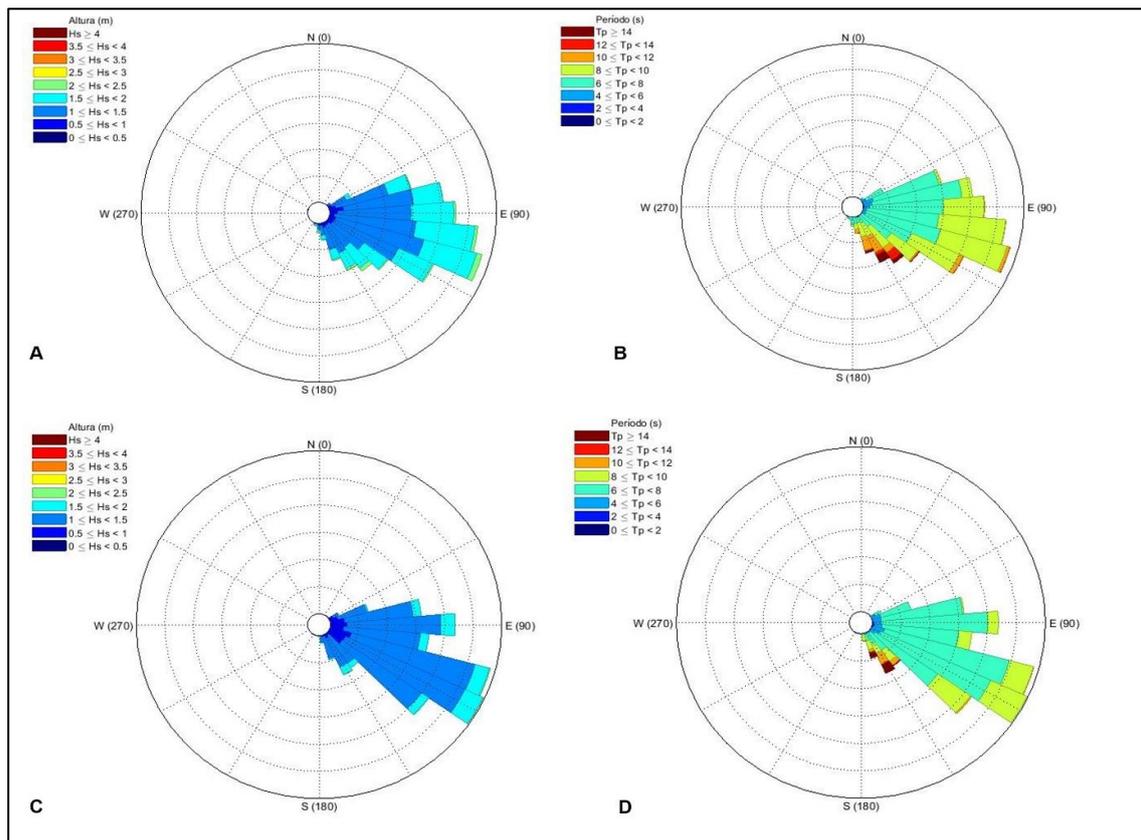


Figura 5 - Rosa de onda da altura significativa e do período de pico para o período de primavera e verão. A e B) Altura significativa e período de pico para a primavera e C e D) Altura significativa e período de pico para o verão.

Segundo a teoria de Ekman o balanço entre a tensão de cisalhamento do vento e a aceleração de Coriolis resulta em um transporte de água perpendicular a direção média do vento (Tomczack & Godfrey, 2001), que sobre a plataforma continental tem o volume de água direcionado a 90° esquerda (hemisfério sul). Segundo Dutra (2008), este acúmulo de água em direção a costa, para a região de Salvador, foi quantificado em 87% de todos os eventos analisados no período de outono e inverno. Isto destaca como uma forçante imprescindível na sobrelevação do nível médio do mar, transporte sedimentar deriva litorânea precisa ser levado em consideração durante as análises dos processos erosivos. As forçantes astronômica (maré), oceânica (ondas e transporte de Ekman) e meteorológicas (vento e sistemas frontais) analisadas conjuntamente com processos de difração, refração e convergência energética de ondas, são os principais mecanismos formadores dos processos erosivos na região, uma vez que a formação de franjas coralíneas nas praias de Vera Cruz é bastante comum. A presença destas franjas recifais geralmente criam áreas protegidas com

menor energia de onda (sombra), porém, pode difratar e gerar a convergência dos trens de ondas, criando perfis erosivos de praia altamente direcionados.

### Cálculo do Potencial Energético das Ondas

Ao longo do ano analisado, os ventos alísios são predominantes do quadrante leste, sendo substituídos por ventos de sul e sul-sudeste durante o inverno. A passagem de sistemas frontais sobre o oceano, próximo a costa sudeste, resulta em um aumento da energia de ondas e uma circulação costeira fortemente associada ao transporte de Ekman. Segundo Dutra (2008), este processo causa o empilhamento de água no litoral leste da ilha de Itaparica, que somado a variação semi-diurna das marés, faz com que o nível médio do mar atinja as maiores amplitudes e possa aumentar a retirada de sedimentos da praia. Calculamos o potencial energético das ondas para as quatro estações (outono, inverno, primavera e verão), referente aos anos de 2014 a 2018, conforme a Tabela 3. A estação de inverno registrou os maiores valores de Hs (médio e máximo), Tp (médio e máximo) e a potência média, conforme observado pelos

registros bibliográficos. As tempestades apresentam uma potência cumulativa na amplitude das ondas e são responsáveis por transferir grande quantidade da energia da atmosfera para a superfície do oceano (Trujillo & Thurman, 2011; Ozkan *et al.*, 2022), a altura final da onda depende diretamente da intensidade, tempo de duração e o tamanho da pista de vento (Sousa, 2021). Nascimento (2012), mostrou que durante os meses de outono e inverno, a alta energia das ondas gera maiores casos de erosão na costa leste do município de Vera Cruz, concordando com os dados observados em nosso trabalho durante o período amostrado.

Tabela 3 - Potência energética média ao longo das quatro estações.

ESTAÇÃO	Hs		Tp		P
	méd (m)	máx (m)	méd (s)	máx (s)	méd (KW/m)
OUTONO	1,39	3,13	8,24	12,0	8,41
INVERNO	1,74	3,88	8,73	14,1	14,07
PRIMAVERA	1,40	2,56	7,99	12,00	11,01
VERÃO	1,17	2,05	7,43	12,00	5,21

A partir da equação utilizada para calcular a potência energética ( $P = 0,4906 \cdot H_s^2 \cdot T_p$ ), pudemos observar que as maiores alturas registradas nos períodos de outono e inverno apresentaram os valores máximos de P, indicando a importância da altura (Hs) para o cálculo da potência média. Este fato coincide com a ocorrência de grandes marés equinociais e uma maior frequência da entrada de frente frias próximas ao litoral sul da Bahia (Dutra, 2008). As altas velocidades do vento, nos meses de julho a setembro foram responsáveis pelo aumento na frequência dos eventos erosivos registrados nestes meses. Os valores de energia observados durante o verão são menores e tendem a gerar o retrabalhamento sedimentar da praia. Criando, normalmente, perfis acrescivos com areias mais finas e menor deriva sedimentar (Muehe *et al.*, 2015). Segundo Pianca *et al.* (2010), no litoral baiano, durante o verão, existe uma diminuição da energia das ondas gravitacionais de sul para norte,

reduzindo o impacto das ondas sobre a costa leste de Itaparica.

### Diagramas de Refração de Ondas e Deriva Litorânea

Em nosso trabalho simulamos diagrama de refração para as frentes de ondas mais comuns na costa leste de Vera Cruz, podendo observar que as ondas provenientes de sul-sudeste (SSE), leste (E) e sudeste (SE) sofrem difração ao entrarem em contato com os bancos de corais e estruturas rochosas que antecedem as praias do leste da ilha de Itaparica. Apresentando focos significativos de convergência quando comparado as ondas provenientes de leste (E), uma vez que estas ondas só atingem uma porção do extremo sul da ilha. Nossos resultados concordam com Nascimento (2012) e a Figura 6 mostra que a entrada de ondulações de SE e SSE ocorre de forma perpendicular a linha de costa. Devido a maior amplitude de onda nestas direções o impacto erosivo e o retrabalhamento do sedimento de praia é conseqüentemente maior. As ondas que alcançam as praias a leste município de Vera Cruz sofrem refração e difração ao se aproximarem da praia, formando focos de convergência que concentram a energia das ondas e das correntes costeiras. A irregularidade na formação das estruturas coralíneas gera descontinuidade no campo de ondas, intensificando o processo de refração e difração (Chistofolletti, 1980; Sousa *et al.*, 2005; Ghiasian *et al.*, 2021). Desta forma observamos áreas com altas taxas de erosão pontual associadas a estas formações de corais, quando comparadas a áreas adjacentes. Concluímos que a direção e a magnitude da deriva litorânea estão relacionada as variações de altura e o ângulo de aproximação da onda em relação ao longo da linha de costa.

De modo geral, os resultados mostram que, durante a primavera e verão, os processos erosivos e à deriva litorânea efetiva na costa leste de Vera Cruz é predominantemente de nordeste para sudoeste. Induzidos principalmente pela constância da ondulação de leste e leste-nordeste durante esta época do ano (Figura 7).

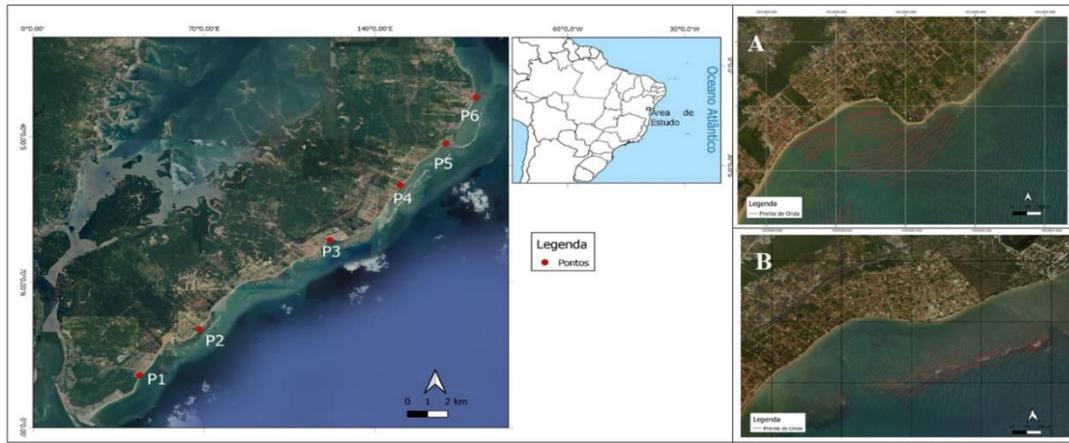


Figura 6 - Áreas com maior potencial de erosão, segundo (Nascimento, 2012), selecionadas para análise da energia de ondas e potencial energético. Figura A - Ponto 2 e Figura B – Ponto 3.

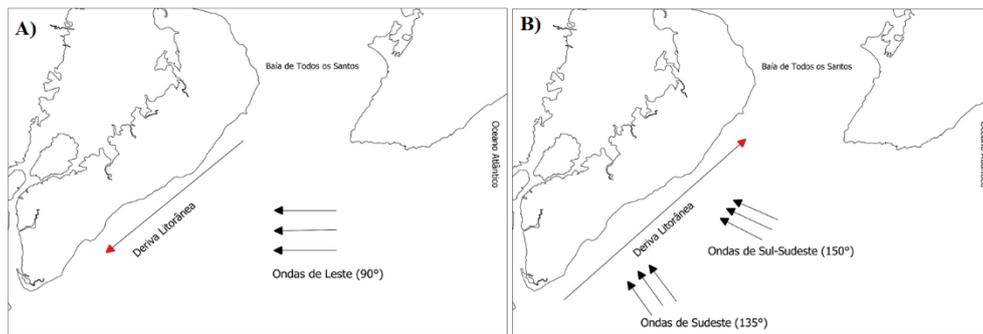


Figura 7 – Transporte resultante da deriva litorânea no litoral leste de Vera Cruz (BA), associado a direção do campo de ondas para (A) Leste (90°), durante verão e primavera. (B) Sudeste (135°) - Sul-Sudeste (150°) para outono e inverno.

O ângulo predominante de ação das ondas associado a inclinação da linha de costa do município, induz este transporte meridional para a região sudeste. Nos meses de outono e inverno, a predominância dos ventos dos quadrantes sudeste e sul-sudeste, induzem uma ondulação com ângulo de ataque direto, perpendicular à linha de costa. Somado ao aumento do potencial energético neste período, observamos um conseqüente aumento na remoção e transporte sedimentar associados a deriva litorânea. Devido a posição dos bancos de coral paralelos a costa a entrada direcionada das ondas em virtude dos processos de difração e

refração aumentam a taxa de erosão nos pontos P4, P3 e P2 apresentados na Figura 6. A fim de analisar de forma individualizada o sentido e a intensidade potencial da deriva litorânea efetiva para as 6 áreas (Figura 6) apresentamos a Tabela 5 juntamente com os dados de direção predominante. É possível observar que nas 6 áreas analisadas as frentes de onda de SE e SSE apresentaram a maior altura próximo a costa, com períodos mais longos e percentuais de incidência menores (37 para SE e 6 para SSE).

Tabela 5 - Intensidade potencial da deriva litorânea para os pontos de controle no litoral leste de Vera Cruz (BA).

Ponto	Direção da frente de onda	Ângulo de incidência ( $\alpha$ )	Altura da onda ao longo da linha de costa (H) em (m)	Intensidade potencial da deriva litorânea por unidade de área $x = \text{sen}\alpha \cdot \text{cos}\alpha \cdot H^2 \cdot (100)$	Percentual de incidência anual das ondas	Intensidade da deriva X percentual de incidência	Componente principal da deriva	Intensidade potencial da deriva efetiva
1	E	20	1	32	57	1832	SW	2915
	SE	45	1,5	113	37	4163	NE	
	SSE	60	1,5	97	6	585	NE	
2	E	10	1	17	57	975	SW	3709
	SE	50	1,5	111	37	4099	NE	
	SSE	60	1,5	97	6	585	NE	
3	E	10	1	17	57	975	SW	3558
	SE	50	1,5	111	37	4099	NE	
	SSE	70	1,5	72	6	434	NE	
4	E	8	1	14	57	786	SW	3545
	SE	50	1,5	111	37	4099	NE	
	SSE	80	1,5	38	6	231	NE	
5	E	8	1	14	57	786	SW	3748
	SE	50	1,5	111	37	4099	NE	
	SSE	70	1,5	72	6	434	NE	
6	E	0	1	0	57	0	SW	4330
	SE	50	1,5	111	37	4099	NE	
	SSE	80	1,5	38	6	231	NE	

Provavelmente, a intensidade potencial da deriva litorânea por unidade de área seja o principal componente para estimativa local em cada um dos pontos. Conforme mencionamos anteriormente, os campos de onda de SE e SSE apresentam o maior potencial erosivo especialmente quando co-ocorrem com eventos de maré meteorológica intensa. Nos meses de outono e inverno, foram registrados para a região 1, ao sul de Vera Cruz, as ondas de SE com um potencial de deriva próximo a 113 e intensidade de 2915. Nesta área a posição da linha de costa é praticamente paralela a direção da deriva litorânea, o que caracteriza essa região com os menores impactos erosivos das 6 áreas analisadas. As áreas 2 e 5 apresentaram intensidades potenciais de deriva superiores a 3700, devido principalmente a intensidade por unidade de área bastante alta em trens de ondas vindos de SE. A ação das ondas de sudeste nestas regiões ocorre de forma perpendicular a linha de costa e as formações coralíneas tendem a

direcionar o potencial energético das ondas sobre a praia.

O ponto 6, devido a sua posição geografia ao norte da ilha de Itaparica, não sofre influência das ondas de leste, devido a proteção criada pelo município de Salvador (BA). Este ponto tem sua intensidade potencial de deriva efetiva de 4330, calculada com base nas ondulações de SE e SSE, com altos valores de incidência durante o inverno. Estes valores além de considerados altos para os padrões das praias do nordeste brasileiro, podem ser responsáveis por grande parte dos eventos erosivos observados na região durante os últimos anos. A ocorrência das marés de sizígia durante estes processos erosivos favorece a sobrelevação do nível do mar, além de permitir um maior alcance das ondas na região emersa da praia. De acordo com Bittencourt *et al.* (2008) e Dutra (2017), Weiner *et al.* (2021), os casos de intensa erosão na região estão fortemente associados a focos de convergência de ondas provenientes do quadrante sudeste, concordado com nossos resultados e com

o que foi exposto inicialmente por Nascimento (2012).

### Conclusões

A análise conjunta dos processos oceanográficos e meteorológicos que formam as ondas e correntes costeiras responsáveis pela erosão das praias é um primeiro passo para compreensão deste fenômeno na região da Baía de Todos os Santos. As modificações da linha de costa observadas na costa leste do município de Vera Cruz (BA) são resultado da convergência de processos oceânicos e atmosféricos e sua compreensão é fundamental para tomada de decisão das autoridades competentes. Nosso estudo mostrou que os eventos erosivos ocorridos ali são fruto de processos naturais sazonais relacionados diretamente a atuação do clima de ondas na região. O padrão das ondas foi predominante caracterizado pela direção leste, nordeste, sul, sudeste e sul-sudeste, com maiores amplitudes energéticas nas direções sul e sul-sudeste. As frentes-de-onda de leste são predominantes durante a primavera-verão e produzem uma deriva litorânea de sentido nordeste-sudoeste (NE-SW), enquanto as frentes de onda de sul, sudeste e sul-sudeste, no outono e inverno, resultam em um processo de transporte sedimentar no sentido sudoeste-nordeste (SW-NE).

A maior intensidade potencial na área de estudo é induzida pelas ondas que chegam à costa com maior energia, sendo estas mais frequentes durante o período de outono-inverno. A convergência destas ondas por ação das franjas intermareais de coral é responsável pelos casos de maior retirada do sedimento de praia nos pontos analisados P3, P4 e P5. Nestas regiões as ondas costumam difratar nos bancos de corais e direcionar sua energia para pontos específicos da praia, causando um maior impacto erosivo sobre estas regiões. Em condições extremas, as varrições de maré associadas a eventos de tempestades ocorrem o aumento do potencial destrutivo chegando a intensidades de deriva por percentual de incidência superior à 4000. A ação destas estruturas no clima de onda deve ser considerada caso seja necessário a construção de estruturas de contenção futuramente.

Trata-se de uma linha de costa que se encontra, em geral, em equilíbrio, porém apresenta mudanças de curto e médio prazo principalmente nos meses de outono e inverno. A ação antrópica também pode influenciar na estabilidade do balanço sedimentar, uma vez a retirada de vegetação costeira para construção de estruturas urbanas e barracas de comércio de praia podem

alterar estabilidade do sedimento de praia e de dunas.

As informações obtidas por este trabalho são fundamentais para o monitoramento ambiental e que possa servir de base para trabalhos futuros na região. Desta forma, acreditamos que a dinâmica costeira deve ser analisada em diversas escalas temporais e espaciais, pois frequentemente diferentes processos podem contribuir para um determinado resultado da linha de costa. Os efeitos sobre a região de praia têm como causa as mudanças a longo prazo, como variação do nível do mar, alterações no regime de ventos, ação das correntes costeiras e as mudanças que ocorrem devido as variações direcionais do campo de ondas em virtude de obstáculos rochosos ou estruturas coralinas.

### Referências

- Amorim, F. N. D., Cirano, M., Marta-Almeida, M., Middleton, J. F., Campos, E. J. D. 2013. The seasonal circulation of the Eastern Brazilian shelf between 10 S and 16 S: a modelling approach. *Continental Shelf Research*, 65, 121-140.
- Andrade, K. M. 2005. *Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 185.*
- Andriolo, U., Gonçalves, G., Sobral, P., Fontán-Bouzas, Á., Bessa, F. 2021. Beach-dune morphodynamics and marine macro-litter abundance: An integrated approach with Unmanned Aerial System. *Science of the Total Environment*, 749, 141474.
- Anthony, E. J. & Aagaard, T., 2020. The lower shoreface: Morphodynamics and sediment connectivity with the upper shoreface and beach. *Earth-Science Reviews*, 210, 103334.
- Biausque, M., Guisado-Pintado, E., Grotoli, E., Jackson, D. W., Cooper, J. A. G., 2022. Seasonal morphodynamics of multiple intertidal bars (MITBs) on a meso-to macrotidal beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47 (3), 839-853.
- Bittencourt, A. C. D. S. P., Dominguez, J., Landim, M., Martin, L., Silva, I. R., 2000. Patterns of sediment dispersion coastwise the State of Bahia-Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 72 (2), 271-287.
- Bittencourt, A. C. P. S., Dominguez, J. M. L., Martin, L., Silva, I. R., 2005. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large-scale

- accumulation and erosive zones: An overview. *Marine Geology*, 219, 219- 234.
- Bittencourt, A. C. S. P., Medeiros, K. O. P., Dominguez, J. M. L., Guimarães, J. K., Dutra, F. R. L. S., 2008. Severe Coastal Erosion Hotspots in the City of Salvador, Bahia, Brazil. *Shore & Beach*, 76 (1) 8–14.
- Bittencourt, A. C. D. S. P., De Farias, F. F., Boas, G. D. S. V., 2018. Influência da deriva litorânea no desenvolvimento do esporão de Caixa-Pregos (Baía de Todos os Santos/BA). *Revista Brasileira de Geociências*, 20 (1-4), 198-200.
- Brandão, A. M., 2019. Características Sazonais do Campo de Ondas e Limites da Shoreface no Litoral Norte da Bahia.
- Cabral, C. L. & Castro, J. W. A., 2022. Registro Sedimentar de Ciclones Extratropicais no Início do Século XX na Região dos Lagos Fluminenses, Sudeste do Brasil: Análise de Dados Multi-Proxies. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23 (2), 1304-1316.
- Caccamo, M. T. & Magazu, S. On the breaking of the Milankovitch cycles triggered by temperature increase: The stochastic resonance response. *Climate*, 9 (4), 67, 2021.
- Calliari, L. J., Muehe, D., Hoefel, F. G., Toldo, J. R. E., 2003. Morfodinâmica praias: uma breve revisão. *Revista brasileira de oceanografia*, 51(UNICO), 63-78.
- Castro, B. M. & Miranda, L. B., 1998. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. *The Sea* 11, 209- 251.
- Christofolletti, A. *Geomorfologia*. 2. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- Cirano, M., Mata, M. M., Campos, E. J., & Deiró, N. F., 2006. A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação global OCCAM. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, 209-230.
- Cirano, M. & Lessa, G. C., 2007. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25 (4), 363-387.
- Da Silva, B. M. F.; Santos Júnior, O. F.; Scudelari, A. C., 2020. Erosão em Falésias Costeiras e Movimentos de Massa no Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Geosciences= Geociências*, 39 (2), 447-461.
- Davies, J. L., 1980. *Geographical variation in coastal development*, 2nd edn. New York: Longman. 212, 1980.
- De Gois, L. A. & Niédja, M. G. A., 2010. A Contribuição do Escoamento Superficial e da Drenagem de Águas Pluviais para os Processos Erosivos no Litoral de Olinda, Pernambuco, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10 (4), 457-481.
- De Oliveira Gomes, G., Horn Filho, N. O., Moresco, B. S., 2022. Evidências deposicionais e/ou erosivas em dois setores do arco praias Joaquina-Morro das Pedras, ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23 (1).
- De Souza Medeiros, E. C., Pantalena, A. F., Miola, B., De Lima, R. S., De Oliveira Soares, M., 2014. Percepção ambiental da erosão costeira em uma praia no litoral do Nordeste do Brasil (Praia da Taíba, CE). *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 14 (3), 471-482.
- Dominguez, J. M. L., Bittencourt, A. C. S. P., Martin L., 1992. Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea-level history, trade winds and climate. *Sedimentary Geology*, 80, 213-232.
- Dutra, F. R., Cirano, M., Bittencourt, A. C., Tanajura, C. A., & Lima, M., 2014. Meteorological tides and episodes of severe coastal erosion on the coast of Salvador, Bahia State, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 32 (4), 615-636.
- Fernandez-Fernandez, S., Silva, P. A., Ferreira, C. C., Carracedo-Garcia, P. E., 2020. Longshore Sediment Transport Estimation at Areao Beach (NW Portugal) under Climate Change Scenario. *Journal of Coastal Research*, 95 (SI), 479-483.
- Gallop, S. L., Kennedy, D. M., Loureiro, C., Naylor, L. A., Muñoz-Pérez, J. J., Jackson, D. W., Fellowes, T. E., 2020. Geologically controlled sandy beaches: Their geomorphology, morphodynamics and classification. *Science of the Total Environment*, 731, 139123.
- Ghiasian, M., Carrick, J., Bisson, C., Haus, B. K., Baker, A. C., Lirman, D., Rhode-Barbarigos, L., 2021. Laboratory quantification of the relative contribution of staghorn coral skeletons to the total wave-energy dissipation provided by an artificial coral reef. *Journal of marine science and engineering*, 9 (9), 1007.
- Guimarães, R. C., Oleinik, P. H., De Paula Kirinus, E., Lopes, B. V., Trombetta, T. B., Marques, W. C., 2019. An overview of the Brazilian continental shelf wave energy potential. *Regional Studies in Marine Science*, 25, 100446.

- Inman, D. L. & Nordstrom, C.E., 1971. On the tectonic and morphological classification of coasts. *Journal of Geology*, 709, 1-21.
- Jaramillo-Torres, M. G., Carpintero Moreno, E., Stratigaki, V., Troch, P., 2020. Time-domain wave propagation modelling for assessing the impact of WEC farms on the wave field and the local morphodynamics and sediment transport. In *General Assembly*, 36-38.
- Kousky, V., 1979. E. Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 107, n. 9, p. 1140-1153.
- Lessa, G. C., M. Cirano, F. Genz, C. A. S. Tanajura & R. R. Silva, 2009. Oceanografia física. In: Hatje, V. & J. B. D. Andrade (EdS), *Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos*. EDUFBA, Salvador: 69-119.
- Martínez, M., Lorenzo, E., Álvarez, A., 2017. Los Ciclos de Milankovitch: Origen, Reconocimiento, Aplicaciones en Cicloestratigrafía y el estudio de Sistemas Petroleros. *Revista Científica y tecnológica UPSE*, 4(3), 56-65.
- Mishra, M., Acharyya, T., Chand, P., Santos, C. A. G., Da Silva, R. M., Dos Santos, C. A. C.; Kar, D., 2022. Response of long-to short-term tidal inlet morphodynamics on the ecological ramification of Chilika lake, the tropical Ramsar wetland in India. *Science of The Total Environment*, 807, 150769.
- Muehe, D., 2005. Aspectos gerais da erosão costeira no Brasil (general aspects of coastal erosion in Brazil). *Mercator*, 4, 7.
- Muehe, D. C. E. H., Lins-de-Barros, F., De Oliveira, J. F., Klumb-Oliverira, L., 2015. Pulsos erosivos e resposta morfodinâmica associada a eventos extremos na costa leste do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 16 (3).
- Muehe, D., Castro, L. B., Albino, J., 2020. Perfis de praia: deve o método das balizas de Emery se abandonado? *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21, 209-215.
- Müller, T. J., Ikeda, Y., Zangenberg, N., & Nonato, L. V. (1998). Direct measurements of western boundary currents off Brazil between 20 S and 28 S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C3), 5429-5437.
- Nascimento, L., 2012. Comportamento da Linha de Costa nos últimos 50 anos e o risco de prejuízos econômicos na face oceânica da Ilha de Itaparica, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Brazil, 124.
- Nervino, M. R., & Klammler, H. R., 2020. Investigação da dinâmica costeira e processos erosivos entre Praia do Forte e Guarajuba, no Litoral Norte da Bahia, Brasil. *Bahia Análise & Dados*, 30(1), 134-156.
- Neves, C. F. & Muehe, D., 2008. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. *Parcerias Estratégicas*, Brasília, DF, 27, 217-295.
- Ozkan, C., Mayo, T., Passeri, D. L., 2022. The potential of wave energy conversion to mitigate coastal erosion from hurricanes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (2), 143.
- Peduzzi, M., Agreli, H. L. F., Espinoza, P., Koyama, M. A. H., Meireles, E., Baptista, P. C. P., West, M., 2022. Relações entre clima de equipe e satisfação no trabalho na Estratégia Saúde da Família. *Revista de Saúde Pública*, 55.
- Pereira, M. D. B., De Oliveira Moura, M., Lucena, D. B., 2020. Análise da variabilidade pluviométrica interanual da zona da mata nordestina e a identificação de anos padrão. *Revista Brasileira de Climatologia*, 26, 2020.
- Peterson, R. & Stramma, L., 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progr. Oceanography*, 26 (1): 1-73.
- Pianca, C.; Mazzini, Piero Luigi F.; Siegle, E., 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, n. 1, p. 53-70, 2010.
- Pucino, N., Kennedy, D. M., Carvalho, R. C., Allan, B., Ierodiaconou, D., 2021. Citizen science for monitoring seasonal-scale beach erosion and behaviour with aerial drones. *Scientific reports*, 11(1), 1-17.
- Provan, M., Ferguson, S., Murphy, E., 2022. Storm surge contributions to flood hazards on Canada's Atlantic Coast. *Journal of Flood Risk Management*, e12800.
- Purkiani, K., Paul, A., Vink, A., Walter, M., Sschulz, M., Harckel, M., 2020. Evidence of eddy-related deep-ocean current variability in the northeast tropical Pacific Ocean induced by remote gap winds. *Biogeosciences*, 17(24), 6527-6544.
- Rede Ondas, 2021. Rede de Monitoramento de Ondas em Águas Rasas. Disponível em: <https://redeondas.furg.br/pt> . Acesso em: Dezembro 2021.
- Ruiz-Etcheverry, L. A. & Saraceno, M., 2020. Sea level trend and fronts in the South Atlantic Ocean. *Geosciences*, 10(6), 218.
- Saprykina, Y., Shtremel, M., Volvaiker, S., Kuznetsov, S., 2020. Frequency downshifting in wave spectra in coastal zone and its influence on mudbank formation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), 723.

- Scudelari, A. C., Braga, K. G., Costa, F. A. A., & Santos Jr, O. F. (2005). Estudo dos processos erosivos instalados na praia de Pipa-RN. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 9(1), 31-37.
- Servian, J., Stricherz, J. N., Legler, D. M., 1996. TOGA pseudo-stress atlas 1985-1994. Volume 1: Tropical Atlantic. Centre ORSTOM, Plouzane, France, 158.
- Silva, I. R., Bittencourt, A. C., Dominguez, J. M., Martin, L., 2001. Principais padrões de dispersão de sedimentos ao longo da costa do descobrimento, sul do estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 31 (3), 307-312.
- Sousa, P., Pinheiro, L., Morais, J., Carvalho, D., Lima, J., Lima, M., 2006. Processos erosivos e balanço sedimentológico na praia de Paracuru–Ceará–Brasil. In VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology.
- Sousa, M. F., 2021. Clima de ondas ao largo e no entorno da Ilha de Trindade-Arquipélago de Martin Vaz. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 104.
- Spicer, P., Matte, P., Huguenard, K., Rickard, L. N., 2021. Coastal windstorms create unsteady, unpredictable storm surges in a fluvial Maine estuary. *Shore & Beach*, 89(2), 3.
- Stramma, L., England, M. 1999. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104, C9, 20863-20883.
- Tanajura, C.A.S., Genz, F., Araujo, H. A., 2010. Mudanças climáticas e recursos hídricos na Bahia: validação da simulação do clima presente do HadRM3P e comparação com os cenários A2 e B2 para 2070-2100. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 345-358.
- Tebaldi, C., Strauss, B. H., Zervas, C. E., 2012. Modelling sea level rise impacts on storm surges along US coasts. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014032.
- Tessler, M. G. & Goya, S. C., 2005. Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro. *Revista do Departamento de Geografia*, 17, 11-23.
- Tomczack, M. & Godfrey, S., 2001. *Regional Oceanography: An Introduction*. Elsevier, 382p, 2001.
- Trujillo, A. P. & Thurman, H. V., 2001. *Essentials of Oceanography*. 10. USA: Prentice Hall. 551.
- Von Storch, H. & Woth, K., 2008. Storm surges: perspectives and options. *Sustainability Science*, 3(1), 33-43.
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L., 2020. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature climate change*, 10(3), 260-263.
- Webb, E. J. & Magi, B. I., 2022. The Ensemble Oceanic Niño Index. *International Journal of Climatology*.
- Weiner, D. M., Aamro, V. E., De Carvalho, I. Q., Do Nascimento Araújo, P. V., 2021. Geotecnologias aplicadas na análise da dinâmica costeira na desembocadura do Rio Punaú-RN, Nordeste do Brasil. *REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA*, 1(15), 21-41.