



# **ANÁLISE COMPARATIVA DA SUSCETIBILIDADE COSTEIRA ENTRE TRECHOS COM DUNAS NATURAIS E ESTRUTURAS RÍGIDAS EM PRAIAS DISTINTAS NO NORDESTE DO BRASIL: DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA CLASSIFICAÇÃO DE REGIMES DE IMPACTO**

Antonio Roger Ramos Nogueira <sup>1</sup>

Davis Pereira de Paula <sup>2</sup>

Yan Gurgel Vasconcelos <sup>3</sup>

Melvin Moura Leisner <sup>4</sup>

Arthur Santiago de Araújo Rodrigues <sup>5</sup>

## **RESUMO**

Este estudo tem como objetivo comparar e analisar a subida máxima do espraio de ondas (runup) em duas praias da Região Metropolitana de Fortaleza (CE), com dunas frontais e estruturas rígidas de proteção costeira, em contextos distintos de urbanização. Para auxiliar este trabalho, foi utilizado um software desenvolvido com linguagem de programação, que utiliza equações empíricas e classifica o resultado em regimes de: swash, collision, overwash e inundation. O sistema computacional desenvolvido em linguagem python requer dados hidrodinâmicos como altura significativa das ondas ( $H_s$ ), período ( $T$ ) e comprimento de onda ( $L_o$ ), que para este estudo foram obtidos através de boias de monitoramento, além de informações altimétricas detalhadas dos perfis de praia analisados. Esses dados foram obtidos por meio de levantamentos de campo com o uso de equipamento GNSS-RTK (Real Time Kinematic), garantindo alta precisão nos registros topográficos. As áreas de estudo selecionadas foram as praias do Iguape, no município de Aquiraz (litoral leste), e do Icaraí, em Caucaia (litoral oeste), ambas no estado do Ceará. Para efeito comparativo, foram analisados quatro trechos: duas dunas frontais e dois enrocamentos em cada praia. Na praia do Iguape, tanto o setor com duna frontal quanto o com enrocamento apresentaram regime de swash, o que indica que a energia das ondas não ultrapassa a base das feições costeiras. Essa condição sugere um ambiente morfologicamente mais estável e com maior capacidade natural de dissipação de energia em virtude da disponibilidade de sedimentos no sistema. Em contraste, a praia do Icaraí demonstrou um cenário mais grave. O setor com duna, localizado a barlar dos espigões, também apresentou regime de swash, indicando eficiência na contenção da energia das ondas. No entanto, o setor com enrocamento, situado fora da área diretamente protegida pelos espigões, apresentou regime de collision, evidenciando que o espraio atinge e ultrapassa a base da estrutura, o que evidencia um trecho de maior suscetibilidade a eventos de alta energia. Em observações de campo, foi verificado que em alguns casos, em virtude da variação do nível da água, pode acontecer overwash e atingir as estruturas urbanas, mesmo sendo classificado como collision. Dessa forma, este trabalho evidencia a superioridade funcional de sistemas naturais bem desenvolvidos, como dunas frontais, frente a estruturas rígidas mal dimensionadas ou posicionadas.

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso de **Geografia** da Universidade Estadual - UECE, [antonio.roger@aluno.uece.br](mailto:antonio.roger@aluno.uece.br);

<sup>2</sup> Professor orientador: Doutor, Universidade Estadual - UECE, [davispp@gmail.com](mailto:davispp@gmail.com);

<sup>3</sup> Doutorando do Curso de **Geografia** da Universidade Estadual - UECE, [yan.vasconcelos@aluno.uece.br](mailto:yan.vasconcelos@aluno.uece.br);

<sup>4</sup> Doutorando do Curso de **Geografia** da Universidade Estadual - UECE, [melvin.moura@outlook.com](mailto:melvin.moura@outlook.com);

<sup>5</sup> Graduando do Curso de **Geografia** da Universidade Estadual - UECE, [arthur.santiago@aluno.uece.br](mailto:arthur.santiago@aluno.uece.br).



## INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas é um fenômeno responsável por interferir nos padrões de temperatura e clima, tornando os eventos climáticos cada vez mais presente e extremos e afetando diferentes partes do planeta, sobretudo, a zona costeira. Em contrapartida, o censo 2022, do IBGE revelou que mais da metade da população brasileira, reside na faixa litorânea do país. Nesse sentido, o valor estratégico do litoral se dá pelo fato dessa região abrigar uma parcela considerada das atividades econômicas (e.g. portos, indústrias, atividades pesqueiras, e turismo) desenvolvidas no mundo (Silva, 2006 apud Bendô, 2017).

A combinação desses fatores tem ampliado significativamente os riscos de inundação marinha em áreas costeiras vulneráveis, sobretudo nas de baixa altitude e com grande dinâmica morfológica. A situação se torna ainda mais agravante, frente ao cenário da subida relativa do nível do mar e de fortes tempestades, levando a uma maior dependência de estruturas de proteção costeira existentes ou a instalação de novas defesas (Blenkinsopp, 2023).

Baseado nisso, o presente estudo busca comparar o grau de suscetibilidade em trechos com dunas e estruturas rígidas nas praias do Icarai (ce) e Iguape (ce), utilizando um programa computacional que calcula a subida de ondas em uma determinada área e posteriori classifica o resultado em um nível de impacto. Foi necessário o uso da fórmula empírica desenvolvida por Stockdon et al. (2006), para estimar de forma prática e confiável, o valor do *runup* de ondas. Esse cálculo matemático combinado a escala de impacto de tempestades proposta por Sallenger (2000), permite classificar o resultado em *swash*, *collision*, *overwash* ou *inundation*.

A aplicação desse modelo computacional pode ser uma ferramenta essencial para simular cenários futuros de risco, levando a elaboração de planos de adaptação, como o reposicionamento de infraestruturas, o reforço de dunas frontais e o zoneamento de áreas vulneráveis a essa problemática. Dessa forma, o programa não apenas classifica possíveis impactos costeiro, mas também orienta estratégias para enfrentar os desafios agravados pela crise climática global.

## METODOLOGIA

O estudo realizou uma análise comparativa da suscetibilidade costeira em dois trechos de praias da Região Metropolitana de Fortaleza (CE), Iguape e Icarai, com foco em ambientes



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE  
**GEOMORFOLOGIA**

com dunas frontais naturais e estruturas rígidas de proteção, como enrocamentos. Para isso, o trabalho foi dividido em etapas de revisão bibliográfica, experimento de campo e processamento e análise dos dados em laboratório.

- A) Revisão bibliográfica: Essa etapa é indispensável na elaboração do trabalho acadêmico, pois permite fundamentar teoricamente a investigação com base em estudos já existentes. Buscou-se coletar informações as mais diversas possíveis, a fim de se aprofundar na temática abordada neste trabalho.
- B) Experimento de campo: Os trabalhos foram realizados no mês de março de 2023 na Praia do Icarai e 2025 na Praia do Iguape. E permitiu coletar dados topográficos dos trechos, através do levantamento planialtimétrico. Para isso, foi utilizado GPS Geodésico para coletar as informações com alta precisão. Além do receptor GNSS-RTK foi utilizado Aeronave remotamente pilotada (ARP) para registrar fotografias aéreas, usadas para elaborar produtos cartográficos com alto nível de detalhamento. Essas atividades ainda possibilitaram identificar o comportamento hidrodinâmico durante o levantamento, fator esse fundamental nas interpretações e análises realizadas posteriormente em laboratório.
- C) Trabalho de laboratório: Os registros fotográficos somado com as coordenadas dos perfis praial permitiram através do programa Agisoft Metashape gerar modelos cartográficos com alta resolução e precisão dos pontos coletados. Além dos registros de cota das estruturas obtidos com o auxílio dos receptores GNSS, também foram obtidos os dados de onda como altura significativa ( $H_s$ ) e Período ( $T$ ), através do sistema de monitoramento da costa brasileira (Simcosta).
- D) Cálculo do runup: O modelo usado para cálculo foi desenvolvido através de linguagem de programação em *Python 3*. para calcular o valor estimado da subida de ondas foi utilizada a equação empírica de Stockdon que mostra o resultado excedido por 2% das ondas ( $R_{2\%}$ ).

$$R_{2\%} = 1.1 \left[ 0.35 \cdot \beta_f \cdot (H_0 L_0)^{0.5} + \left( \frac{H_0 L_0 (0.563 \cdot \beta_f^2 + 0.004)}{2} \right)^{0.5} \right]$$

Figura 1. Equação empírica de Stockdon et. al (2006).

Após o cálculo através do modelo computacional, foi possível verificar o regime de impacto utilizando a escala de Sallenger 2000.

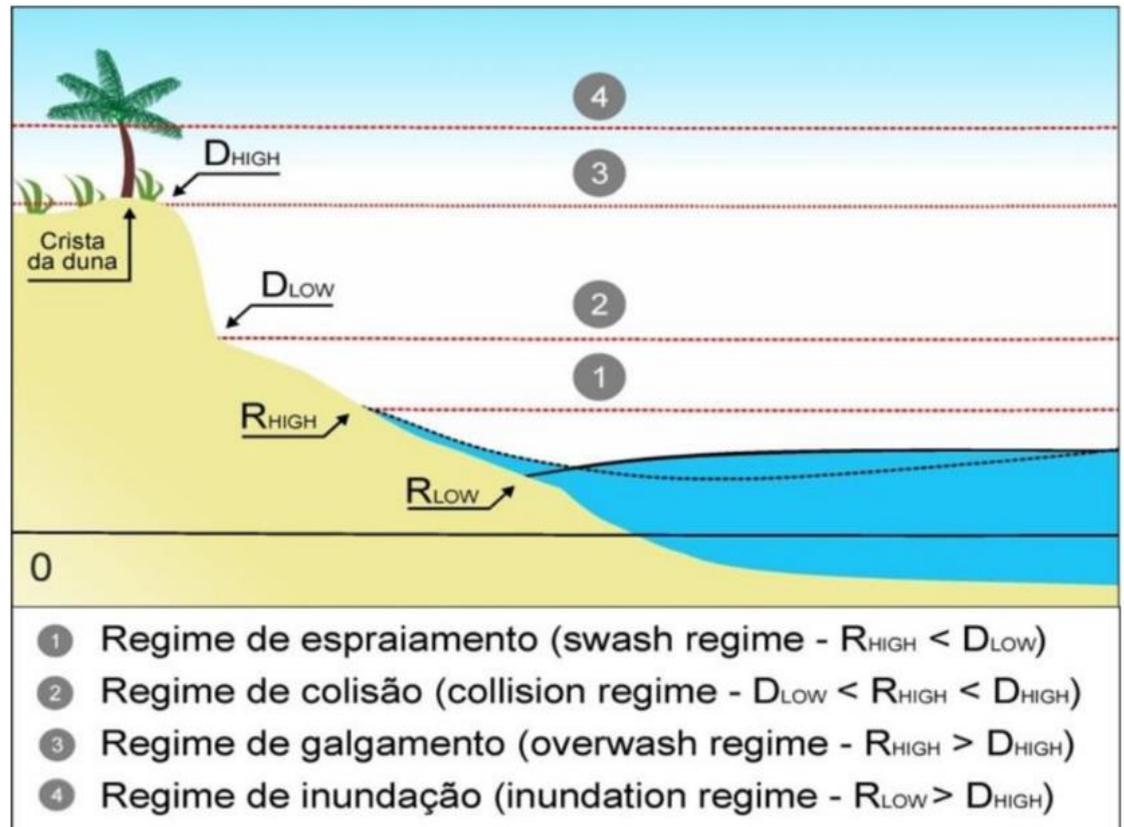


Figura 2. Diferentes regimes de impacto definido por Sallenger (2000). De Bendô et. al (2017).

A figura 2, mostra diferentes cenários baseados na escala de impacto costeiro. Onde,  $R_{high}$  e  $R_{low}$  representa o espraio máximo e mínimo das ondas, enquanto  $D_{high}$  e  $D_{low}$  mostra o coroamento e a base das estruturas. Com base nesses parâmetros, é possível estimar a classificação do runup em um dos quatro regimes presentes na tabela.

- A) Regime de *Swash*: é o regime de menor impacto, onde o espraio ocorre na região da face e praia e não alcança a base da estrutura.
- B) Regime de *Collision*: aqui, o espraio máximo é superior a base da estrutura e é capaz de remover o material sedimentar presente no caso de dunas ou berma.
- C) Regime de *Overwash*: parte da água ultrapassa a crista da proteção e atingir estruturas posterior a esta.

D) Regime de *Inundation*: nesse estágio, o espraio mínimo alcança a cota da estrutura frontal, logo ocorre uma inundação muito maior e uma deposição de material sedimentar na parte protegida pelas estruturas.



Figura 3. A) Trecho com presença de enrocamento na Praia do Iguape (Ce). B) Trecho com presença de Duna frontal na Praia do Iguape. C) Trecho com a presença de duna e enrocamento na Praia do Icaraí.

## REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão dos impactos das tempestades costeiras e da dinâmica do runup (avanço máximo das ondas sobre a praia) é fundamental para a análise de riscos em ambientes litorâneos, especialmente em tempos de intensificação dos eventos extremos associados às mudanças climáticas. Nesse contexto, destacam-se as contribuições empíricas de Stockdon et al. (2006) e a abordagem classificatória de impactos proposta por Sallenger Jr. (2000).

O trabalho de Stockdon et al. (2006) propõe uma parametrização empírica para a elevação extrema do runup, com base em dados de experimentos de campo realizados em diversas praias naturais. A fórmula mais utilizada refere-se ao valor de runup excedido em 2%



das ondas ( $R_2\%$ ), que resulta da combinação entre o setup (elevação média do nível da água induzida pela quebra das ondas) e o swash (variação vertical oscilatória em torno dessa média). A parametrização leva em consideração variáveis como a altura significativa das ondas em águas profundas ( $H_s$ ), o comprimento de onda profundo ( $L_o$ ), o período das ondas ( $T$ ) e a inclinação da praia ( $\beta$ ), sendo fortemente influenciada pelo número de Iribarren ( $\xi$ ), uma medida adimensional que relaciona o declive praiial com a energia das ondas incidentes.

A escala de Sallenger (2000) é relevante por incorporar explicitamente a interação entre a forçante oceânica (ondas e maré de tempestade) e a geometria do terreno, oferecendo uma abordagem qualitativa e quantitativa para prever e classificar os impactos físicos de tempestades sobre os ambientes costeiros. Sua integração com modelos como o de Stockdon et al. (2006) permite não apenas estimar o runup, mas também inferir os possíveis danos associados à elevação das águas em função da topografia litorânea.

Dessa forma, a união entre a modelagem empírica do runup e a classificação dos impactos conforme a morfologia costeira forma uma base teórica robusta para estudos de vulnerabilidade, planejamento urbano costeiro e desenvolvimento de sistemas de alerta precoce.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do cálculo de runup revela contrastes significativos entre as praias analisadas, especialmente quanto à vulnerabilidade costeira diante de diferentes condições de onda. Na praia do Iguape, sob condições de ondas do tipo vaga, tanto a duna quanto o enrocamento apresentaram regimes de *swash*, indicando estabilidade e ausência de impacto erosivo relevante, com o runup não ultrapassando as cotas de proteção natural ou artificial. A declividade da praia ( $\beta$ ) e a menor energia das ondas influenciaram diretamente para que os valores de  $R_2\%$  se mantivessem abaixo das estruturas analisadas, o que revela uma situação de menor risco para os ambientes costeiros locais.

PRAIA	ESTRUTURA	DATA	Tipo de Onda	Hs (m)	T (s)	$\beta$	D_HIGH	D_LOW	R2% (m)	REGIME
IGUAPE	DUNA	29.03.25	VAGA	1.0	9.0	0.4	8.0	4.0	3.63	SWASH
IGUAPE	ENROCAMENTO	29.03.25	VAGA	1.0	9.0	0.1	4.0	3.0	1.04	SWASH
ICARAÍ	DUNA	25.03.23	SWELL	1.1	12.0	0.5	8.0	4.0	6.0	COLLISION
ICARAÍ	ENROCAMENTO	25.03.23	SWELL	1.1	12.0	0.5	5.0	2.0	6.0	OVERWASH

Tabela 1. Resultados do cálculo de runup e classificação dos regimes de impacto nas praias do Iguape e Icaraí.

Em contrapartida, a praia do Icaraí apresentou uma situação crítica diante de ondas de maior energia (swell), refletida em números elevados de runup, superiores a 6 metros. A duna registrou um regime de colisão, mostrando que o avanço das ondas está alcançando a base dessa estrutura, gerando erosão e instabilidade morfológica. Ainda mais agravante é o caso do enrocamento, onde o runup superou o coroamento da estrutura rígida, caracterizando o regime de *overwash*, com possibilidade de transposição de água e sedimentos para a parte posterior da estrutura, o que representa risco de alagamentos e danos à infraestrutura urbana, cenário este que pode ser observado em campo.

Esses dados demonstram que a topografia da praia, o tipo de estrutura costeira e as condições de onda influenciam diretamente na intensidade dos impactos, sendo o regime de impacto uma ferramenta essencial para prever e classificar esses efeitos. Diante disso, reforça-se a necessidade de estratégias específicas de monitoramento e planejamento costeiro, considerando tanto as características morfológicas e hidrodinâmicas locais quanto os cenários de aumento na frequência e intensidade dos eventos extremos, especialmente em áreas urbanizadas como Icaraí. O uso de métodos quantitativos como o cálculo de runup e a aplicação da escala de impacto de Sallenger (2000) mostra-se eficaz para subsidiar a gestão de riscos costeiros.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho discutido mostra o uso de modelo computacional para calcular a corrida de ondas (runup) e classificar o grau de impacto sobre estruturas de proteção costeira entre dunas e enrocamentos. Apesar de tratar-se de um programa relativamente novo, o modelo evidencia que estruturas naturais, bem desenvolvidas a exemplo de dunas frontais, pode ser mais eficaz frente galgamento de Ondas sobre as mesmas, e reduzir os riscos de inundação, impedindo prejuízos como acidentes e perda de bens patrimoniais. Em contraste, a instalação de estruturas de proteção mal projetadas, sem a realização de estudos prévios como cálculos



matemáticos para previsão da subida das ondas, poderá em alguns casos não cumprir o seu papel de proteger construções e/ou infraestruturas frente a eventos de alta energia.

Desta forma, busca-se realizar novos testes de aplicação para comprovar a eficiência do modelo proposto neste trabalho. O objetivo futuro é transformar o programa de cálculo e classificação de riscos uma ferramenta simples e de fácil acesso ao público interessado. Do mesmo modo, o programa poderá ser uma alternativa para o monitoramento costeiro de futuros estudos. Além das constatações obtidas neste estudo, ressalta-se a importância de integrar abordagens tecnológicas como esta aos planos de ordenamento territorial e à formulação de políticas públicas voltadas à gestão costeira. A possibilidade de aplicar um modelo computacional para simulação de cenários extremos de impacto costeiro contribui significativamente para a mitigação de riscos e reforça a necessidade de uma atuação preventiva, especialmente em áreas urbanizadas sob constante pressão antrópica.

A articulação entre ciência, tecnologia e gestão territorial, como proposta neste trabalho, torna-se cada vez mais urgente frente à intensificação dos impactos das mudanças climáticas. Assim, estudos como este reforçam o papel da pesquisa aplicada na promoção de soluções sustentáveis para os desafios enfrentados nas zonas costeiras.

**Palavras-chave:** gestão costeira, ferramenta web, estruturas frontais, escala de impacto.

## REFERÊNCIAS

- BENDÔ, A. R. R. et al. Implicação da extensão vertical máxima das ondas de ressaca do mar sobre a vulnerabilidade da Praia do Icaraí (Caucaia-CE, Brasil). In: PAULA, D. P. de (org.). *Cooperação em pesquisa aplicada às zonas costeiras dos países de língua portuguesa*. [S. l.]: Universidade de Lisboa, 2017.
- BLENKINSOPP, C. E. et al. Remote sensing of wave overtopping on dynamic coastal structures. *Remote Sensing*, Basel, v. 14, n. 3, p. 513, 2022.
- SALLENGER Jr., A. H. Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, West Palm Beach, v. 16, n. 3, p. 890–895, 2000.
- STOCKDON, H. F. et al. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, Amsterdam, v. 53, p. 573–588, 2006.