

Índice de Vulnerabilidade Costeira de Árboletes (IVCA): uma ferramenta para avaliar os efeitos da passagem de frentes frias e furacões no Caribe Colombiano

Coastal Vulnerability Index for Árboletes (IVCA): an multiparameter approach to evaluate the impacts from cold fronts and hurricanes in the Colombian Caribbean

Andrés Felipe Gallón Guarín

Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

andresfelipe.gallonguarin041@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-5911-7449>

Vladimir Giovanni Toro-Valença

Universidad de Antioquia, Turbo, AN, Colômbia

vladimir.toro@udea.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-4398-9472>

David Valença Dantas

Universidade do Estado de Santa Catarina, Laguna, SC, Brasil

david.dantas@udesc.br

 <https://orcid.org/0000-0001-6890-1313>

Eduardo Gentil

Universidade do Estado de Santa Catarina, Laguna, SC, Brasil

eduardo.gentil@udesc.br

 <https://orcid.org/0000-0002-6139-8636>

RESUMO

Regiões costeiras são particularmente vulneráveis aos impactos decorrentes de eventos extremos, tais como furacões e frentes frias. Neste sentido, o presente trabalho determinou o grau de vulnerabilidade costeira para o município de Árboletes a partir de um índice específico que foi desenvolvido para este fim. Para tanto, foram analisados eventos extremos (frentes frias e furacões) que ocorreram em 2020, tendo este referido ano, apresentado número anormalmente positivo de eventos desta natureza. O índice aqui proposto chamado de Índice de Vulnerabilidade Costeira de Árboletes (IVCA), foi implementado a partir do *input* de distintas variáveis ambientais, a saber: altura das ondas, amplitude das marés, nível do mar, precipitação, geomorfologia e taxas de erosão. Os resultados encontrados sugerem que os setores com maior vulnerabilidade encontram-se nas áreas topograficamente mais baixas do litoral onde centenas de famílias exercem atividades socioeconômicas e que historicamente tem sofrido os efeitos da erosão costeira. Adicionalmente, foi possível observar que sob condições antes e após a passagem de eventos extremos, a região apresentou vulnerabilidade classificada como baixa e moderada, sugerindo a influência destes episódios atípicos sobre a região. Esperamos que a presente contribuição possa auxiliar na tomada de decisões acerca da gestão integrada da zona costeira e do planejamento territorial.

Palavras-chave: Gerenciamento costeiro; Eventos extremos; Planejamento territorial.

ABSTRACT

Coastal regions are particularly vulnerable to impacts from extreme events such as hurricanes and cold fronts. In this sense, the present work evaluated the coastal vulnerability on Árboletes (Colombia) based on a specific index that was

developed to solve this problem. For this purpose, extreme events (cold fronts and hurricanes) that occurred in the year 2020 were analyzed, due the positive anomaly number of these events in this area. The index proposed here, called Coastal Vulnerability Index for Árboletes (IVCA), was implemented based on different environmental variables: significant wave height, tidal amplitude, sea level, precipitation, geomorphology and, coastal erosion rates. The results suggests that the most vulnerable sectors are found in the topographically lower zones along the coast where hundreds of families lives developing different socioeconomic activities and which have historically suffered the effects of coastal erosion. Additionally, it was possible to observe that under "before" and "after" of extreme events, in general terms the region presented vulnerability classified as low to moderate, suggesting the influence of these atypical episodes on the region. We hope that this contribution can help in decision-making about the integrated management of coastal zone and territorial planning.

Keywords: Coastal management; Extreme events; Territorial planning.

1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são ambientes transicionais caracterizados pela interação entre o ambiente marinho e o terrestre, fator este responsável por desencadear processos oceanográficos, climáticos e geológicos específicos (Vernette; Correa; Bernal, 2012). Estes ambientes possuem ecossistemas notavelmente produtivos e que desempenham importante papel ecológico e econômico, tais como: manguezais, pântanos, recifes de coral, lagoas costeiras, estuários, entre outros (Burningham, 2004). Entretanto, sabe-se que estas áreas são particularmente vulneráveis a cenários de alterações climáticas globais (Sales, 2009) e seu efeitos deletérios (Rodríguez *et al.*, 2010).

Notadamente, um dos impactos decorrentes das mudanças climáticas são o aumento do nível do mar (Núñez-Gómez *et al.*, 2016), sendo este responsável por alterações na morfologia da costa, processos erosivos e redução das áreas de dunas (Botello *et al.*, 2010). Outro impacto decorrente das mudanças climáticas é o aquecimento da temperatura superficial dos oceanos, fator que pode implicar numa maior recorrência de eventos meteorológicos extremos (Trenberth; Fasullo, 2008).

Segundo a literatura, a climatologia do mar do Caribe e da América Central é amplamente controlada pela migração de sistemas sinóticos (Taylor; Alfaro, 2005), com destaque para a migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), intrusão de frentes frias advindas de médias latitudes durante o inverno boreal e a propagação de distúrbios tropicais para o oeste, tais como ondas de leste e furacões (Alfaro; Pérez-Briceño, 2014).

As frentes frias caracterizam-se por apresentarem ventos intensos, chuvas torrenciais e expressiva nebulosidade (Hastenrath, 1991), devido ao encontro das massas de ar frio com massas de ar quente (Thompson, 1998). Diferentes autores investigaram esses fenômenos no mar do Caribe, como por exemplo nos efeitos de eventos extremos sobre as ondas na bacia colombiana (Ortiz-Royero *et al.*, 2013), e que, em condições de El Niño, esses eventos aumentam a sua incidência (Hernández, 2002). Os eventos de ondas e ventos extremos no mar do Caribe, que causam impactos significativos, devem ser estudados visando a adoção de estratégias de gestão costeiras mais eficazes (Devis *et al.*, 2017).

A região do mar do Caribe costuma ser sazonalmente impactada pela passagem de furacões. Estes sistemas dinâmicos que se originam sobre os oceanos tropicais durante os períodos de verão-outono são gerados principalmente pelas interações oceano-atmosfera (Knutson *et al.*, 2015). Nas últimas décadas a recorrência de furacões tem aumentado em frequência e intensidade, sendo furacões de categoria 3, 4 e 5 na escala Saffir-Simpson, os que apresentaram maior moda (Sobel *et al.*, 2016).

Historicamente, o oceano Atlântico apresenta em média 12 registros anuais de sistemas de tempestades, onde 6 destes se tornam furacões (Trenberth *et al.*, 2018). De maneira extraordinária, a temporada de 2020 superou a média estimada, registrando a formação de mais de 30 ciclones tropicais, dos quais 14 foram furacões e 7 furacões de grandes categorias como Delta, Eta e Iota (Blackwell, 2020). Salienta-se que neste mesmo ano foram registradas 14 frentes frias no mar do Caribe.

Sabe-se que a ocorrência de eventos climáticos extremos e o aumento do nível do mar podem induzir fortes processos erosivos e inundações, aumentando a vulnerabilidade de uma determinada região costeira (Nicholls, 2002), promovendo impactos ambientais, sociais e econômicos nestas áreas (Posada-Posada; Pineda, 2008). Assim, faz-se necessário que os planos de gerenciamento costeiro avaliem a adoção de Índices de Vulnerabilidade Costeira (IVCs) regionalizados, pois estes fornecem informações consoantes aos riscos costeiros (Nicholls *et al.*, 2008).

Face ao acima exposto, este trabalho visa o desenvolvimento de um IVC específico para a faixa praial do município de Árboletes (Caribe Colombiano) através da adequação de uma metodologia que já consta na literatura (Gornitz; White; Deniels, 1992), considerando indicadores que dialogam com a realidade local, a saber: geomorfologia, precipitação, taxa de erosão, altura significativa das ondas, marés e nível do mar. Aqui tomamos como referência os dados ambientais do ano de 2020, uma vez que, este se notabilizou pela passagem anômala de frentes frias e furacões.

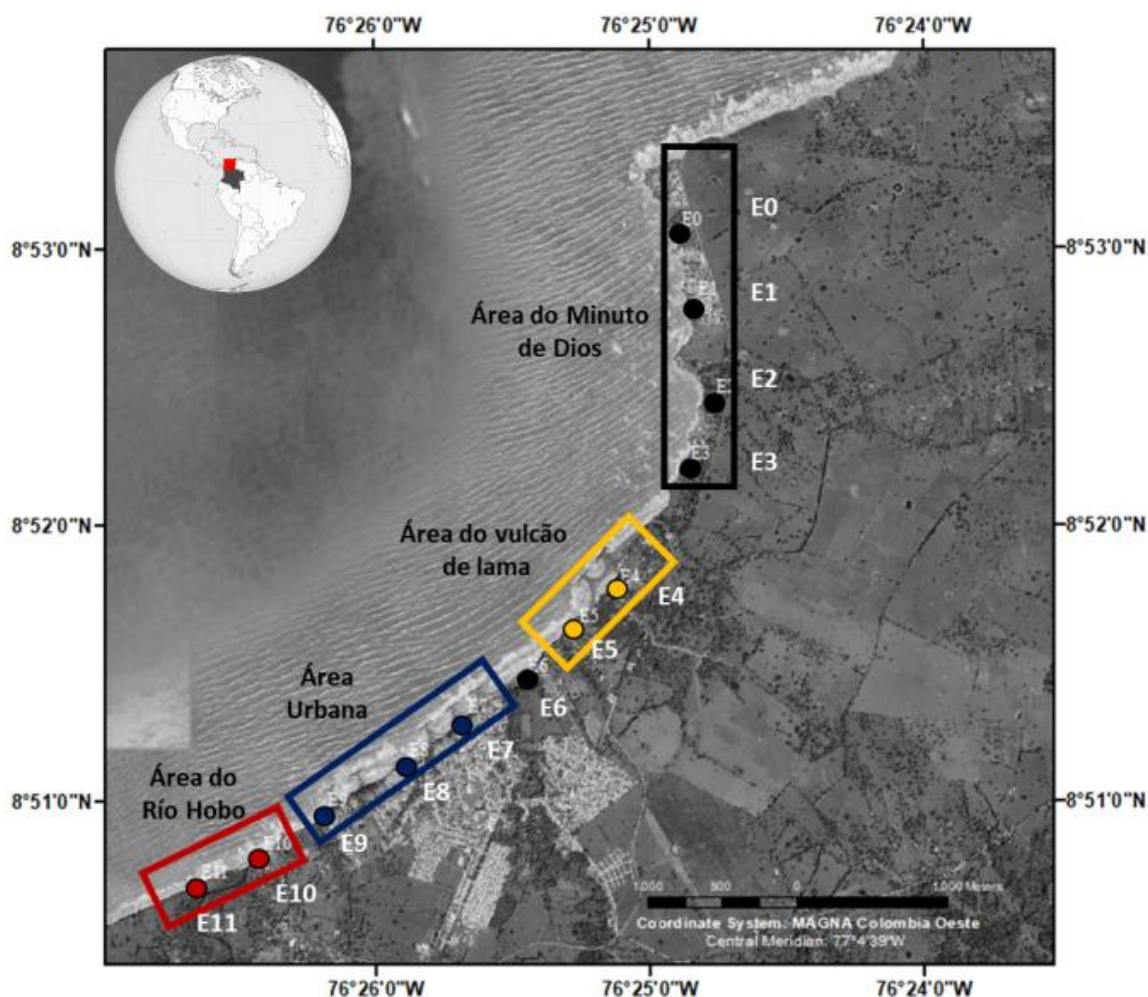
Assim, esperamos contribuir para a geração de parâmetros que permitam nortear futuras medidas de gestão e manejo do litoral de Árboletes.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O município de Árboletes está localizado na região costeira do Golfo de Urabá (mar do Caribe), entre as latitudes 7°55' N e 8°40' N e longitudes 76°53' W e 77°23' W, possuindo 543 km de costa desde Cabo Tiburón até Punta Rey, Árboletes (García-Valencia, 2007) (**Figura 1**).

Figura 1: Zoneamento do litoral do município de Árboletes proposto neste trabalho



Quadrante preto: Minuto de Dios; Quadrante amarelo: Área do vulcão de lama; Quadrante azul: Área urbana; Quadrante vermelho: Río Hobo; O quadrado em vermelho no mapa de localização assinala a posição de Árboletes na Colômbia (hachurado em cinza).

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

O Golfo de Urabá apresenta duas estações climáticas bem definidas, a saber: a estação seca que ocorre no primeiro trimestre do ano, caracterizada por fortes ventos alísios de NE advindos do mar do Caribe, coincidindo com o período em que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) encontra-se mais ao sul. Já segunda é a estação chuvosa, que comumente ocorre entre maio e novembro, com ventos alísios de menor magnitude advindos de sudoeste, momento em que a ZCIT encontra-se em sua posição mais ao norte (INVEMAR, 2003).

O regime das marés no Golfo de Urabá é semi-diurno misto, com amplitudes máximas de ± 40 cm, portanto, a influência das marés no golfo se restringe apenas às áreas de águas confinadas. No que diz respeito ao clima de ondas, a costa caribenha é diretamente influenciada pela migração da ZCIT e pela presença de ventos alísios de noroeste que sopram na estação seca, gerando ondulações com alturas entre 1,5 e 2,5 m (Posada-Posada; Pineda, 2008), eventualmente estes podem contribuir com a aceleração de processos erosivos.

Em relação ao litoral, o município de Árboletes tem 5,5 km de costa e está localizado na parte sul do Caribe Colombiano. Nas últimas décadas os processos de erosão têm sido severos com recuos de até 1,6 km (Correa; Vernet, 2004).

O município de Árboletes (além da sede municipal) é composto por sete corregimentos, sendo estas: El Carmelo, Trinidad, Buenos Aires, Naranjitas, El Guadual, Santa Fe de Las Platas e La Candelaria. O município também possui 56 aldeias tradicionais que abrigam aproximadamente 30 mil habitantes. Na zona urbana do município vivem aproximadamente 10 mil pessoas, enquanto a população rural compreende outras 19,5 mil pessoas.

Neste trabalho, o zoneamento costeiro do município de Árboletes é composto por quatro setores: Minuto de Dios, vulcão de lama, área urbana e setor do rio Hobo. Visando avaliar de forma detalhada a vulnerabilidade do litoral de Árboletes, cada setor possui estações remotas para a análise: Minuto de Dios (E0, E1, E2, E3), Vulcão de Lama (E4 e E5), Área Urbana (E6, E7, E8 e E9) e Rio Hobo (E10 e E11). Ao final, produtos cartográficos foram confeccionados integrando os perfis por setor em formato *shapefile* em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Os maiores aglomerados urbanos estão presentes nos setores Minuto de Dios, rio Hobo e área urbana. Já no setor Vulcão de Lama, estão alguns dos atrativos turísticos do município, atividade que beneficia diretamente centenas de famílias dedicadas ao setor hoteleiro, comércio e turismo.

2.2. Índice de vulnerabilidade costeira de Árboletes (IVCA)

Os índices de vulnerabilidade costeira (IVCs) são empregados para avaliar a vulnerabilidade induzida pela elevação do nível do mar (Gornitz; Kanciruk, 1989), ameaças de erosão e/ou riscos de inundação (Koroglu *et al.*, 2019). A vulnerabilidade refere-se à fragilidade que uma comunidade ou área apresenta diante de eventos físicos, econômicos, sociais ou ambientais que impliquem em efeitos adversos, tais como perdas e danos dos meios de subsistência e habitats (Toro-Valencia *et al.*, 2021).

Propomos uma adaptação do índice proposto pela *United States Geological Survey* (USGS, 1999). Este intento visa adequar a equação generalista para as características regionais de Árboletes, considerando a disponibilidade de informações *in situ* e/ou oriundas de sensoriamento remoto. Assim, o Índice de Vulnerabilidade Costeira de Árboletes (IVCA) é calculado a partir da seguinte **equação (1)**:

$$IVCA = \sqrt{\frac{A*B*C*D*E*F}{6}} \quad (1)$$

Onde: A é a geomorfologia; B é a taxa de erosão; C é a precipitação; D é a altura significativa da onda; E é o nível do mar e F é a amplitude das marés.

Os dados de geomorfologia para o litoral de Árboletes foram classificados de acordo com as tipologias das geoformas observadas da interpretação visual de imagens de satélite com alta resolução espacial (< 1m) e posteriormente validadas pelos relatórios técnicos do projeto PIMECLA (Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la erosión Costera en el Litoral Antioqueño).

As informações concernentes as taxas de erosão (mm/ano) para o litoral de Árboletes foram estimadas a partir da análise multitemporal de dados orbitais do SENTINEL 2 (resolução espacial = 10 m) obtidos para o intervalo correspondente aos anos de 2015 até 2023. Estes dados foram

processados na plataforma *Coastal Analysis via Satellite Imagery Engine* (CASSIE, 2023) e ordenados em transectos com 500 m de espaçamento.

Os dados de precipitação e de amplitude de maré (m) foram obtidos a partir de estações *in situ* obtidas a partir do site do *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* (IDEAM, 2023). Já a amplitude de maré foi obtida a partir dos dados do marégrafo do município de Sapzurro, Chocó, fornecidos pelo *Centro Colombiano de Datos Oceanográficos* (CECOLDO, 2023).

As informações de altura significativa de onda (SWH) e as tendências de elevação do nível médio do mar (mm/ano) foram obtidas a partir de dados de altímetros orbitais. Para SWH foram obtidos produtos orbitais através do portal *Copernicus Marine Data Store* (COPERNICUS, 2023). Já os dados de tendência de elevação do nível médio do mar foram derivados de um produto que mescla as passagens de diferentes altímetros ao longo de 3 décadas de observação e que podem ser baixados pelo site do *Sea Level Research Group* da Universidade do Colorado (*Sea Level Research Group*, 2023).

As análises deste trabalho focadas para o cálculo do IVCA contemplam a análise dos dados supracitados para períodos de ocorrência de eventos extremos ao longo do ano de 2020. Embora somente as condições para eventos extremos sejam aqui apresentadas, ensaios com dados de climatologia para a região foram previamente implementados, visando avaliar o desempenho do índice para condições sob Apenas os dados referentes às tendências de flutuação da linha de costa e de elevação do nível médio do mar para a região de estudo, contemplam uma temporalidade maior, dado que, só é possível identificar tendências de erosão/deposição, bem como, de aumento do nível médio do mar, dentro de uma perspectiva interanual.

De posse das informações advindas das 6 variáveis de entrada acima descritas, cada uma destas recebeu uma mensuração que variou de 1 a 5 (**Tabela 1**), obtendo valor 1, caso a variável isolada apresente um risco “muito baixo” e valor igual a 5, caso esta condicionante apresente valores classificados como de risco “muito alto”. A classificação das variáveis de entrada tem por objetivo permitir que as variáveis possam ser avaliadas conjuntamente através da equação 1, após a padronização proposta pelos valores dispostos pela classificação aqui proposta (vide que estas classes variam entre 1 e 5).

Tabela 1: Classificação da vulnerabilidade de cada variável ambiental analisada.

-	Muito Baixo (1)	Baixo (2)	Moderado (3)	Alto (4)	Muito Alto (5)
Geomorfologia	Tombolos	Falésias (>5 m)	Falésias (<5 m)	Praias	Planícies de maré
Erosão costeira (m)	$\geq +10$	Entre +9,9 e +5	Entre +4,9 e 0	Entre -0,1 e -2	<-2
Precipitação (mm)	0-100	101-200	201-300	301-400	>401
Mudança do nível médio do mar (mm/ano)	<3	Entre 3,1 e 3,3	Entre 3,4 e 3,7	Entre 3,8 e 4	$\geq 4,1$
Altura significativa de onda (m)	0-0,5	0,6-1,0	1,1-1,5	1,5-2,0	> 2,0
Amplitude das marés (m)	<0,6	Entre 0,6 e 0,9	Entre 0,91 e 1,4	Entre 1,5 e 2	> 2

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Após a classificação da vulnerabilidade das variáveis isoladas seguindo as classes propostas pela **Tabela 1**, os dados de IVCA foram calculados através da **Equação 1** para as áreas costeiras E0 até E11 (vide a **Figura 1**). Os valores de IVCA calculados foram organizados em 5 classes temáticas, visando facilitar a compreensão acerca dos resultados obtidos. Assim, os valores de IVCA foram classificados considerando os limiares apresentados na **Tabela 2**.

Após a implementação do cálculo do IVCA para o município foram implementados estudos de caso considerando as condições “antes”, “durante” e “depois” da ocorrência de eventos extremos (frentes frias e furacões).

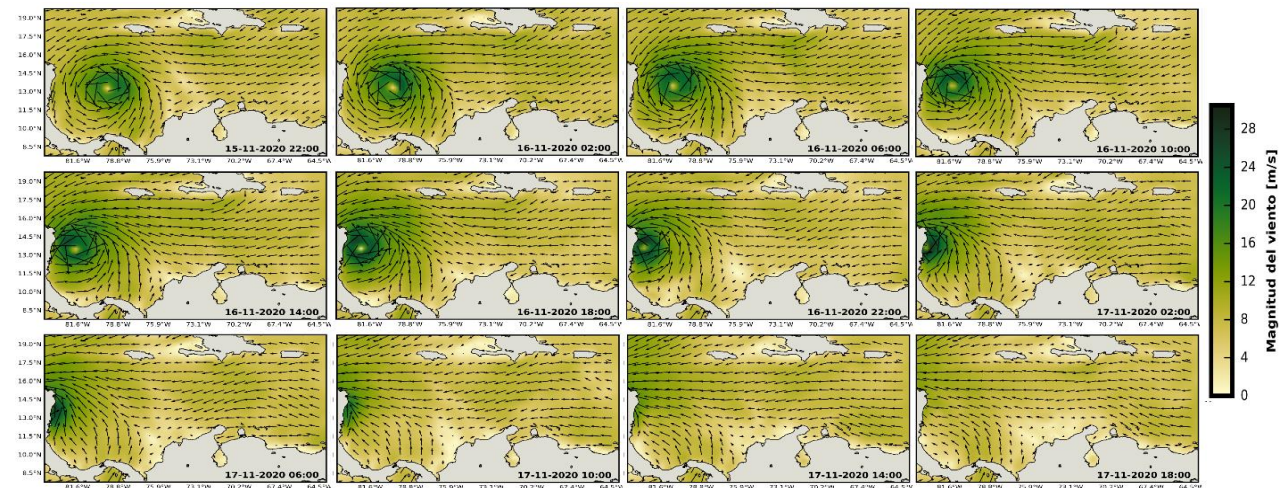
Tabela 2: Distribuição dos valores de IVCA por classe.

Classes temáticas de vulnerabilidade - IVCA	Área em km ²
Muito baixo	Entre 3,16 e 5,05
Baixo	Entre 5,06 e 6,95
Moderado	Entre 6,96 e 8,85
Grave	Entre 8,86 e 10,75
Gravíssimo	>10,76

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Para analisar o desempenho do IVCA sob condições de passagem de frentes frias implementados a equação 1 para os eventos do mês de fevereiro de 2020. Usualmente, esta é a época em que os ventos alísios são mais intensos na região, proporcionando a franca entrada de frentes frias. Salienta-se que em 2020, três frentes frias entraram no Caribe Colombiano. De modo similar, para analisar o desempenho do IVCA sob os efeitos das passagens dos furacões na região, foram analisados os eventos que ocorreram durante os meses de outubro e novembro, onde foram registrados os furacões Zeta (categoria 2), Eta (categoria 4) e Iota (categoria 5) (**Figura 2**). A **Tabela 3** apresenta as datas que foram analisadas para verificar o desempenho do IVCA sob condições de furacões e frentes frias. Salienta-se que as datas/condição (antes, durante e depois) analisadas foram agrupadas em média/condição.

Figura 2: Trajetória e evolução do furacão IOTA entre 13-11-2020 e 15-11-2020 obtidos através de radar escaterômetro



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 3: Datas e eventos analisados neste trabalho (ano: 2020).

Evento	Antes	Durante	Depois
Frentes frias	27-28-29 de Fev	14-16-18 de Fev	24-25-26 de Fev
Furacão Zeta	21-22-23 de Out	27-28-29 de Out	30-31 de Out e 01 de Nov
Furacão Eta	30-31 de Out e 01 de Nov	02-03-04 de Nov	08-09-10 de Nov
Furacão Iota	08-09-10 de Nov	14-15-16 de Nov	19-20-21 de Nov

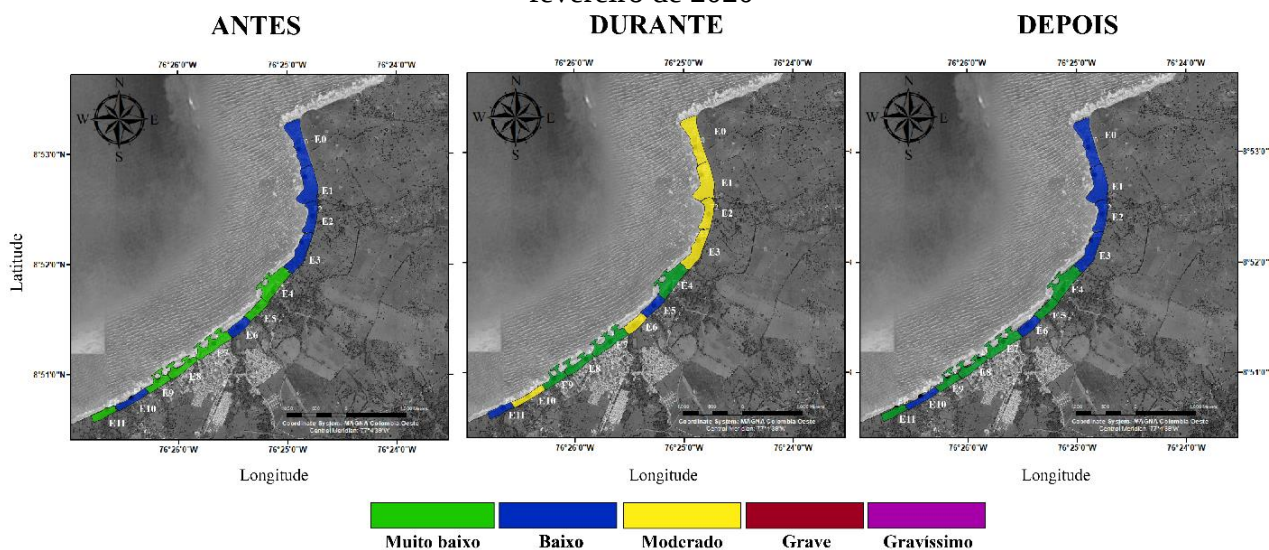
Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Três frentes frias sucessivas passaram pela região de estudo durante o mês de fevereiro de 2020 (02 a 23/02/2020), intensificando a ocorrência de ventos alísios locais. Foi possível identificar que a vulnerabilidade do município de Árboletes era classificada como “muito baixa” e “baixa”, antes e depois do período correspondente a passagem das frentes frias. Entretanto, durante a ocorrência destes eventos extremos, houve maior vulnerabilidade tanto para a área do Minuto de Dios e para o Rio Hobo (classificado como moderado). Já após a passagem das frentes frias pela bacia, a vulnerabilidade voltou a ser registrada entre “muito baixa” e “baixa” (**Figura 3**).

O furacão Zeta transitou pelo Mar do Caribe entre os dias 24 e 29 de outubro de 2020, sendo classificado na categoria dois. Embora Zeta não tenha sido um furacão tão intenso quanto Eta e Iota, desencadeou numa maior vulnerabilidade nas porções central e norte da costa de Árboletes. Paralelamente, a precipitação do mês de outubro foi uma das mais altas. As precipitações podem ter sido responsáveis pela ocorrência de vulnerabilidades “moderadas” antes da entrada do furacão Zeta nas porções próximas ao vulcão de lama e Rio Hobo. Posteriormente, durante o trânsito do Zeta pelo Mar do Caribe, as áreas mais afetadas foram a costa norte. (Minuto de Dios), E6 e o setor Rio Hobo, onde a vulnerabilidade foi classificada como “grave”. Após o trânsito de Zeta, o estado de vulnerabilidade foi classificado como “moderado” em algumas áreas, devido ao fato de que, após o Zeta um outro furacão iniciou a sua passagem pelo mar do Caribe (Furacão Eta) (**Figura 4**).

Figura 3: IVCA diário para os cenários “antes, durante e depois” da passagem de frentes frias em fevereiro de 2020



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

A **Figura 5** mostra a vulnerabilidade antes, durante e depois da passagem do furacão Eta no Mar do Caribe. Este sistema transitou por esta região entre os dias 31 de outubro a 14 de novembro de 2020, tendo sido classificado na escala Saffir-Simpson (Tabela 1) como categoria quatro. Os resultados sugerem que devido à entrada simultânea de furacões durante o mês de outubro pelo mar do Caribe, as regiões centro, norte e Rio Hobo, são particularmente vulneráveis aos efeitos das passagens dos furacões. No entanto, não foram registradas vulnerabilidades “graves”, fato possivelmente associado as baixas precipitações que ocorreram no mês de novembro quando em comparação com o mês de outubro. Após a passagem do Eta, a vulnerabilidade do litoral do município foi classificada entre “muito baixa” e “baixa”, ficando notório a influência das obras de proteção sobre a baixa vulnerabilidade das porções marinhas adjacentes à estes.

Figura 4: IVCA diário para os cenários “antes, durante e depois” da passagem do furacão Zeta

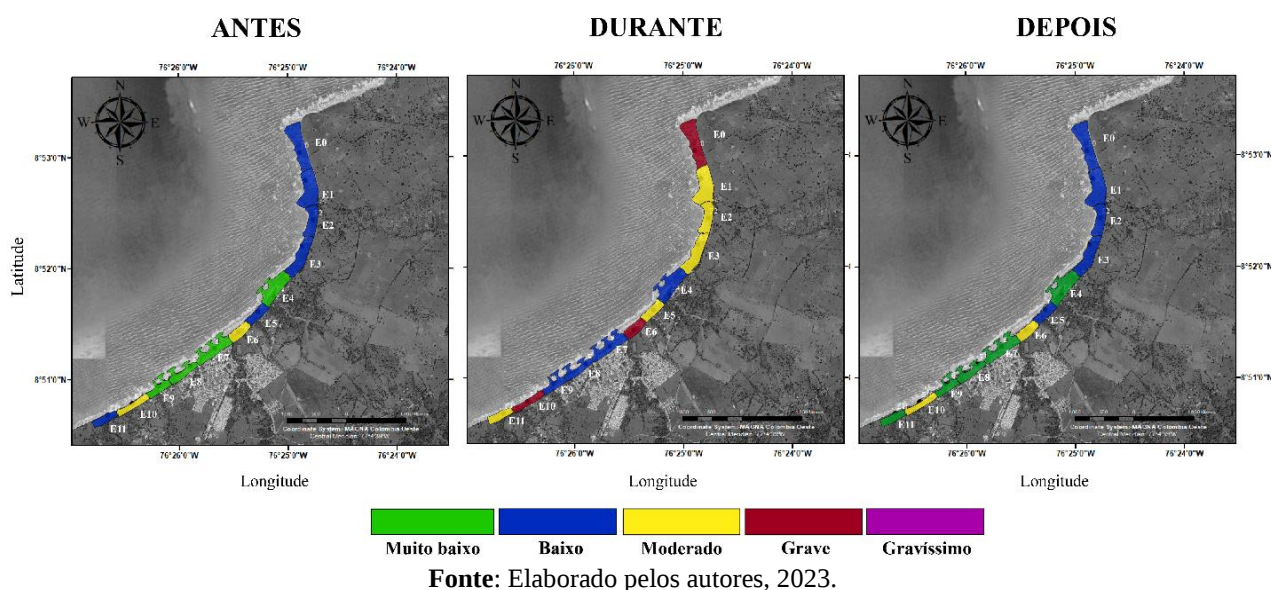
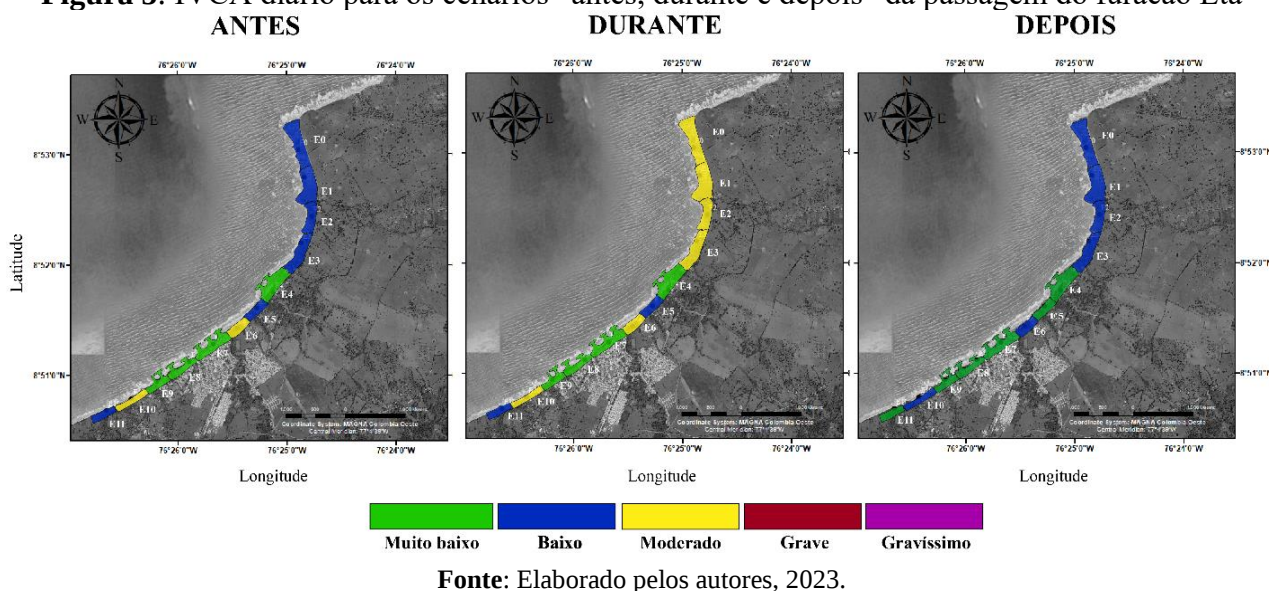


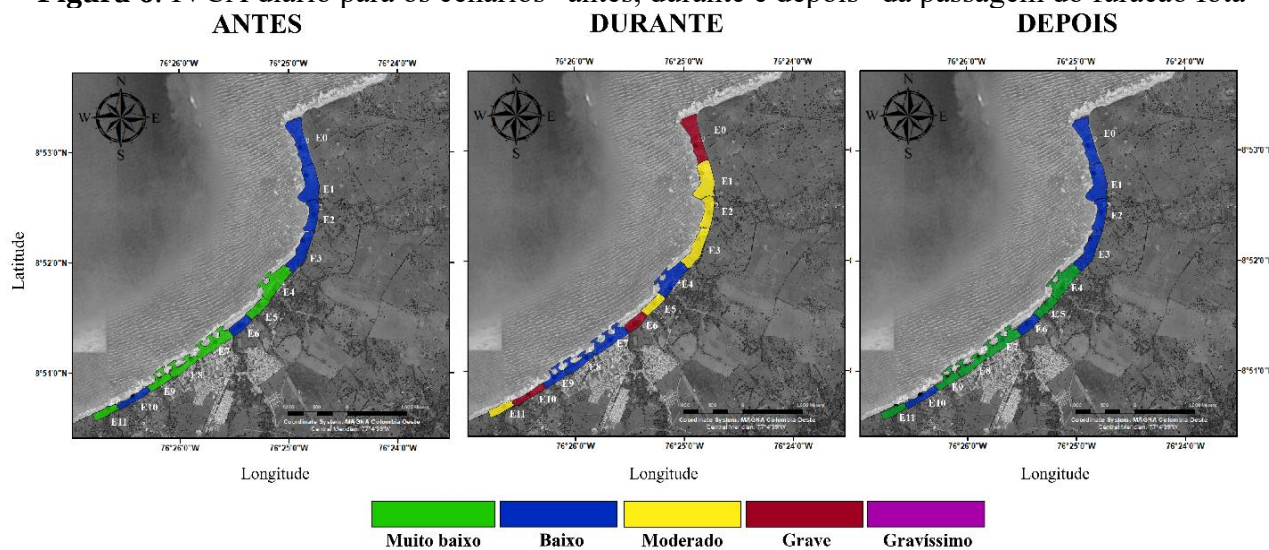
Figura 5: IVCA diário para os cenários “antes, durante e depois” da passagem do furacão Eta



O furacão Iota foi o último e mais intenso furacão da temporada (categoria cinco), tendo ocorrido entre os dias 13 e 18 de novembro de 2020. Conforme apresentado na **Figura 6**, antes da passagem do Iota foram registradas vulnerabilidades entre “baixa” e “muito baixa”. Entretanto, quando Iota entrou pelo Mar do Caribe, provocou um aumento na altura das ondas durante os dias de maior intensidade, principalmente na zona norte, E6 e Rio Hobo, que apresentaram maior vulnerabilidade (estes foram classificados como “graves”). Os resultados ressaltam a influência das obras de proteção costeira, dado que, nas áreas adjacentes a estas as vulnerabilidades foram classificadas como “muito baixa” e “baixa”.

As zonas costeiras topograficamente mais baixas caracterizam-se por uma maior vulnerabilidade à subida do nível do mar e efeitos de fenômenos atmosféricos intensos, desencadeando problemas econômicos (Ballesteros, 2014), sociais (Nicholls; Cazenave, 2010) e ambientais (Wetzel *et al.*, 2012), com consequências graves em áreas densamente povoadas (Scott; Simpson; Sim, 2012) ou com elevada densidade de edificações (Hernández-Delgado, 2015).

Figura 6: IVCA diário para os cenários “antes, durante e depois” da passagem do furacão Iota



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Face ao acima exposto, a adoção de modelos que visem integrar informações distintas com o intuito de prover um panorama para o uso e gestão dos espaços litorâneos tem sido um imperativo no âmbito do gerenciamento costeiro (Marinas *et al.*, 2020). Cada área estudada apresenta particularidades que não podem ser contempladas por modelos genéricos (Gornitz *et al.*, 1994). Paralelamente, a maioria dos estudos dedicados à implementação de índices estão focados em escala global ou de centenas quilômetros de litoral, carecendo, portanto, a disponibilidade de produtos que contemplem escalas menores (Kantamaneni *et al.*, 2017), razão pela qual, foi aqui sugerido um produto específico para o litoral de Árboletes.

Devido à sua posição geográfica ao sul do Caribe Colombiano, o município de Árboletes não está diretamente exposto à passagem de frentes frias e furacões, no entanto, o litoral experimentou mudanças temporárias em variáveis físicas como altura das ondas, ventos e chuvas, como resultado dos efeitos destes refletidos pelo IVCA. Deste modo, é fundamental que os planos de gestão costeira sejam capazes de monitorar periodicamente o litoral, limitando os efeitos adversos advindos destes fenômenos extremos. Notavelmente, os mapas de vulnerabilidade (tais como o IVCA), podem ser de suma importância, revelando de maneira direta onde devem incidir os planos de intervenção e adequação do litoral (Hereher, 2015).

A maré foi a variável que menos influenciou nos valores do IVCA, dado que, a amplitude das marés na região é classificada como micromaré, ou seja, em todos os registros essa variável contribuiu de forma diminuta nas oscilações do IVCA, enquanto a altura de onda e a precipitação foram as variáveis que mais contribuíram para o cálculo. Para estas últimas, a variabilidade dependeu em grande parte das estações climáticas (seca, transição e úmida).

Os dados oriundos do IVCA aqui apresentados revelam as áreas cujas atividades econômicas podem ser diretamente impactadas, podendo em último caso, desalojar dezenas de famílias (Toro-Valencia *et al.*, 2021). Sabidamente o uso e ocupação do litoral de Árboletes foi realizado sem estudos prévios de ordenamento territorial, bem como, sabe-se que este ocorreu em decorrência do desenvolvimento agrícola e da exploração madeireira na região, o que torna a adoção de ferramentas como o IVCA relevantes para futuras medidas de uso e gestão do litoral.

4. CONCLUSÕES

O turismo tem desempenhado um papel importante no desenvolvimento econômico do município de Árboletes, estando entre uma das atividades socioeconômicas mais importantes para a

população, pois centenas de famílias desenvolvem suas atividades hoteleiras e comerciais na faixa litorânea do município. No entanto, essas áreas, principalmente as que apresentam cotas topográficas mais baixas, são mais susceptíveis aos efeitos das mudanças climáticas globais. Por esse motivo, este trabalho buscou avaliar climatologia e eventos extremos a partir do IVCA.

Os eventos extremos registrados durante 2020 mostraram que 14 frentes frias transitaram na região (principalmente na estação seca). Posteriormente, desenvolveu-se uma temporada de furacões hiperativa onde 7 furacões foram de categorias superiores a três e alguns destes transitaram pela bacia da Colômbia. Embora a trajetória desses sistemas tenha ocorrido relativamente distante da região dos Árboletes, os efeitos destes puderam ser evidenciadas na região, principalmente no que concerne ao aumento na altura das ondas, intensidade dos ventos e precipitação. Fato que pode ser observado pelas oscilações espaço-temporais do IVCA.

A adoção do IVCA para a análise da vulnerabilidade sob condições de passagem de frentes frias e furacões, mostrou que a equação apresenta sensibilidade para assinalar estas ocorrências anômalas. Assim, é possível afirmar que o IVCA pode ser utilizado para monitoramentos que forneçam informações sobre a real situação do litoral ao longo do tempo, gerando mapas de gestão de risco, já que centenas de famílias vivem nas porções litorâneas de Árboletes.

Este trabalho é pioneiro na utilização de índices de vulnerabilidade costeira para avaliar o trânsito de frentes frias e furacões próximas ao litoral. Os resultados obtidos nestas propostas são de grande importância para a gestão costeira, fornecendo uma ferramenta operacional para projetos de planejamento territorial costeiro. É sabido que os estudos sobre vulnerabilidade costeira são essenciais para a implementação de medidas de uso sustentável da zona costeira, sendo o IVCA uma relevante alternativa para projetos que trabalham nesta direção.

A vulnerabilidade costeira e o ordenamento do território estão fortemente relacionados, dado que, considerando métricas operacionais de ordenamento do território podemos mitigar a vulnerabilidade costeira, reduzindo impactos e riscos potenciais para o ambiente e para as populações que ocupam o espaço costeiro.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do projeto PROPRAIAS: qualidade ambiental das praias do Brasil e Caribe (NPP2015010003752).

REFERÊNCIAS

ALFARO, E.; PÉREZ-BRICEÑO, P. M. Análisis del impacto de fenómenos meteorológicos en Costa Rica, América Central, originados en los mares circundantes. **Revista de Climatología**, v. 14, p. 1-11, 2014.

BALLESTEROS, G. A. El turismo de naturaleza en espacios naturales. El caso del Parque Regional de las Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar. **Cuadernos de Turismo**, v. 34, p. 33-51, 2014.

BLACKWELL, J. **Record-breaking Atlantic hurricane season draws to an end**. **National Oceanic and Atmospheric Administration**. 2020. Disponível em: <https://www.noaa.gov/media-release/record-breaking-atlantic-hurricane-season-draws-to-end>. Acesso em: 15 ago. 2023.

BOTELLO, A. V.; VILLANUEVA, S.; GALAVIZ, R.; LUISCOED, J. (eds.). **Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático**. 2010. Disponível em: http://www.gppa.com.mx/books/vulnerabilidad_CCParte1.pdf. Acesso em: 15 de ago. 2023.

BURNINGHAM, H. Coasts: form, process and evolution. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 29, n. 1, p. 140-141, 2004.

CASSIE. **Coastal Analysis via Satellite Imagery Engine**. Disponível em: <https://cassiengine.org/>
Acesso em: 15 de ago. de 2023.

CECOLDO. **Centro Colombiano de Datos Oceanográficos**. Disponível em:
<https://cecoldo.dimar.mil.co/web/>. Acesso em: 15 de ago. 2023.

COPERNICUS. **Copernicus Marine Data Store**. Disponível em:
<https://marine.copernicus.eu/access-data>. Acesso em: 16 de ago. 2023.

CORREA, I. D.; VERNETTE, G. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes -Turbo). **Bolet. Invest. Mar. Cost.**, v. 33, p. 5-25, 2004.

DEVIS-MORALES, A.; MONTOYA-SÁNCHEZ, R. A.; BERNAL, G.; OSORIO, A. F. Assessment of extreme wind and waves in the Colombian Caribbean Sea for offshore applications. **Applied Ocean Research**, v.69, p. 10-26. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.09.012>.

GARCÍA-VALENCIA, C. (ed.). **Atlas del golfo de Urabá: Una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó**. 2007. Disponível em: <https://aquadocs.org/handle/1834/5917>. Acesso em: 15 de ago. 2023.

GORNITZ, V.; KANCIRUK, P. Assessment of global coastal hazards from sea level rise. In: 6. SYMPOSIUM ON COASTAL AND OCEAN MANAGEMENT, Charleston, 1989. **Annals [...]**, Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5966579>

GORNITZ, V. M.; WHITE, T. W.; DANIELS, R. C. **A coastal hazards data base for the US east coast**. 1992. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/7061112>. Acesso em: 15 de ago. 2023.

GORNITZ, V.; DANIELS R.; WHITE, T.; BIRDWELL, K. **The Development of a Coastal Risk Assesment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast**. Coastal and Estuarine Research Federation, v. 12, p. 327-338. 1994.

HASTENRATH, S. **Climate Dynamics of the Tropics**. Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1991.

HEREHER, M. E. Coastal vulnerability assessment for Egypt's Mediterranean coast. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 6, n. 4, p. 342-355, 2015. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.845115>

HERNANDÉZ, B. **El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y los frentes fríos que arriban a la región occidental cubana**. Investigación Marina Valparaíso, v. 30, n. 2, p. 1–19. 2002. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-71782002000200001>

HERNÁNDEZ-DELGADO, E. A. The emerging threats of climate change on tropical coastal ecosystem services, public health, local economies and livelihood sustainability of small islands: Cumulative impacts and synergies. **Marine Pollution Bulletin**, v. 101, n. 1, p. 5-28, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.018>

IDEAM. **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales**. Disponível em: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/> . Acesso em: 15 de ago. 2023.

INVEMAR. **Diagnóstico, zonificación y definición de la estructura administrativa y manejo de la unidad costera del Darién, Caribe colombiano**. Fase I. Caracterización y diagnóstico. Informe técnico. p. 698. 2003.

KANTAMANENI, K.; DU, X.; AHER, S.; SINGH, R. M. Building blocks: A quantitative approach for evaluating coastal vulnerability. **Water**, v. 9, n. 12, p. 1-15. 2017. <https://doi.org/10.3390/w9120905>

KNUTSON, T. R.; SIRUTIS, J. J.; ZHAO, M.; TULEYA, R. E.; BENDER, M.; VECCHI, G.; VILLARINI, G.; CHAVAS, D. Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty- first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios. **Journal of Climate**, v. 28, p. 7203– 7224. 2015. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0129.1>

KOROGLU, A.; RANASINGHE, R.; JIMÉNEZ, J. A.; DASTGHEIB, A. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province. **Ocean & coastal management**, V. 178, p. 1-15. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.05.001>

MARINAS, D. I.; PELEGRÍN, G. A. B.; BALIBREA, J. S.; MORENO, P. G.; SERRATO, F. B. Evaluación del índice de vulnerabilidad costera en la Manga del Mar Menor (Murcia, España). **Anales de geografía de la Universidad Complutense**. v. 40, n. 2, p. 373-392. 2020. <http://dx.doi.org/10.5209/AGUC.72979>.

MORE: **Mecanismo online para referências, versão 2.0**. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 15 de ago. 2023.

NICHOLLS, R. Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. **Physics and Chemistry of the Earth**. v.27, p.1455-1466. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00090-6](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00090-6)

NICHOLLS, R. J.; HANSON, S.; HERWEIJER, C.; PARTNORE, N.; HALLEGATTE S.; CORFEE-MORLOT, J.; CHATEAU J.; MUIR-WOOD, R. **Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes: Exposure Estimates**. OECD Environment Working Papers, v. 1, p. 1-62. 2008. <https://doi.org/10.1787/011766488208>.

NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. **Science**. v. 328, n. 5985, p.1517-1520. 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>.

NÚÑEZ-GÓMEZ, J. C.; RAMOS-REYES, R.; BARBA-MACÍAS, E.; ESPINOZA-TENORIO, A.; GAMA-CAMPILLO, L. M. Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. **Investigaciones Geográficas**. n. 91, p. 70-85. 2016. <https://doi.org/10.14350/rig.50172>.

ORTIZ-ROYERO, J. C.; OTERO, L. J.; RESTREPO, J. C.; RUIZ, J.; CADENA, M. Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n. 11, p. 2797–2804. 2013. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2797-2013>.

POSADA-POSADA, B. O.; PINEDA, W. H. **Diagnóstico de la erosión en la Zona Costera del Caribe Colombiano**. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales. n. 13, p. 1-200. 2008.

RODRÍGUEZ, V. T.; GARCÍA, A. M.; CREVENNA, A. B.; HERNÁNDEZ, J. C.; DÍAZ, G. E.; GARCÍA, E. M. **Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático**. SEMARNAT-INE, v.1, p. 325-344. 2010.

SALES-JR, R. F. M. Vulnerability and adaptation of coastal communities to climate variability and sea-level rise: Their implications for integrated coastal management in Cavite City, Philippines. **Ocean & Coastal Management**, v.52, n.7, p. 395-404. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.04.007>.

Sea Level Research Group. Universidade do Colorado. Disponível em: <https://sealevel.colorado.edu/>. Acesso em: 16 de ago. 2023.

SCOTT, D.; SIMPSON, M. C.; SIM, R. The vulnerability of Caribbean coastal tourism to scenarios of climate change related sea level rise. **Journal of Sustainable Tourism**, v. 20, n. 6, p. 883-898. 2012. <https://doi.org/10.1080/09669582.2012.699063>.

SOBEL, A. H.; CAMARGO, S. J.; HALL, T. M.; LEE, C. Y.; TIPPETT, M. K.; WING, A. A. Human influence on tropical cyclone intensity. **Science**, v. 353, p. 242-246. 2016. <https://doi.org/10.1126/science.aaf6574>.

TAYLOR, M.; ALFARO, E. **Climate of Central America and the Caribbean**. In Encyclopedia of World Climatology (Oliver JE, Ed.), Springer, Netherlands, p. 183-189. 2005.

THOMPSON, R. **Atmospheric Processes and Systems**, London, Routledge, 1998. Disponível em: <https://handoutset.com/wp-content/uploads/2022/03/Atmospheric-Processes-and-Systems-Routledge-Introductions-to-Environment-Series-by-Russel-Thompson.pdf>. Acesso em: 16 de ago. 2023.

TORO-VALENCIA, V. G.; PALÁCIO-TOBÓN, C. A.; CORREA-OCHOA, M. A. **Erosión costera en el litoral antioqueño**. Compilación de resultados. 2021. Disponível em: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/26757/4/GobAnt_2021_ErosionCosteraLitoralAntioque%c3%b1o.pdf. Acesso em: 16 de ago. 2023.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. Energy budgets of Atlantic hurricanes and changes from 1970. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v.9, n.9, p. 1-12. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007GC001847>.

TRENBERTH, K. E.; CHENG, L.; JACOBS, P.; ZHANG, Y.; FASULLO, J. Hurricane Harvey Links to Ocean Heat Content and Climate Change Adaptation. **Earth's Future**, v. 6, n. 5, p. 730–744. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018ef000825>.

USGS. **National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast**. Woods Hole: U.S. Geological Survey. 1999.

VERNETTE, G.; CORREA, I. D.; BERNAL, G. **Introducción a los cambios del nivel del mar y sus consecuencias sobre la zona costera**. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. 2012. Disponível em: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55543>. Acesso em: 16 de ago. 2023.

WETZEL, F. T.; KISSLING, W. D.; BEISMANN, H.; PENN, D. J. Future climate change driven sea-level rise: secondary consequences from human displacement for island biodiversity. **Global Change Biology**. v.18. n. 9. p. 2707-2719. 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02736.x>



Informações sobre a Licença

Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.

License Information

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which allows for unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, as long as the original work is properly cited.