



## **CAPÍTULO XIV**

---

### **IMPLICAÇÃO DA EXTENSÃO VERTICAL MÁXIMA DAS ONDAS DE RESSACA DO MAR SOBRE A VULNERABILIDADE DA PRAIA DO ICARAÍ (CAUCAIA-CE, BRASIL)**



# IMPLICAÇÃO DA EXTENSÃO VERTICAL MÁXIMA DAS ONDAS DE RESSACA DO MAR SOBRE A VULNERABILIDADE DA PRAIA DO ICARAÍ (CAUCAIA-CE, BRASIL)

A. R. R. Bendô<sup>1</sup>; I. F. P. Lima<sup>1</sup>; J. W. S de Lima<sup>1</sup> e D. P. de Paula<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil/Laboratório de Engenharia Ambiental e Geotecnologias, Universidade Estadual Vale do Acaraú, 62.040-370, Sobral, Ceará, Brasilrayltonbendo@gmail.com, limaifp@gmail.com, wellingtonseveriano@outlook.com

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil/Doutor em Ciências do Mar, da Terra e do Ambiente/Laboratório de Engenharia Ambiental e Geotecnologias, Universidade Estadual Vale do Acaraú, 62.040-370, Sobral-Ceará, Brasil. davispp@yahoo.com.br

## RESUMO

Os riscos e a vulnerabilidade costeira a eventos de alta energia (e.g. ressacas do mar) induzidos pelas mudanças climáticas globais deverão aumentar os impactos referentes à inundação costeira e à erosão em médio e longo prazos, o que influenciará diretamente as atividades desenvolvidas ao longo das comunidades de costa. Como consequência disso, uma grande parte das áreas dessas regiões sofrerá com perdas de equipamentos urbanos e terras úteis, afetando diretamente a economia local e diminuindo a capacidade do ambiente em prestar serviços ecossistêmicos importantes à sociedade. Este artigo apresenta uma abordagem regional baseada no monitoramento e na avaliação de experimentos de diferentes condições de mar para região da Praia do Icaraí, localizada no litoral Nordeste do Brasil, mais especificamente, no estado do Ceará. A metodologia é baseada no levantamento de perfis topográficos transversais à linha de costa a partir de cinco seções controle, aliado ao cálculo de espreamento de ondas e das respectivas cotas de inundação. Isso permite inferir em que escala de impacto, proposta por Sallenger (2000), se enquadra cada perfil praiado durante fenômenos de alta energia. De forma geral, a região do Icaraí apresentou vulnerabilidade

homogênea, apresentando o regime de colisão em quase todos os setores e períodos em estudo.

**Palavras-chave:** Zonas vulneráveis; ressacas do mar; regimes de impacto; inundação.

## ABSTRACT

Risks and coastal vulnerability to high-energy events (e.g. storm surge) induced by global climate change are expected to increase coastal impacts when it comes to coastal flooding and erosion, which will directly influence activities developed throughout the world's coastal communities. Therefore, a large proportion of coastal areas will suffer from losses of urban equipment and coastal land, directly affecting the local economy and reducing the capacity of the environment to provide important ecosystem services to society. This article aims to analyze the coastal vulnerability in relation to morphodynamic changings and overtopping events in Icaraí beach during high frequency natural processes. An amount of 05 beach profiles was evaluated during 05 different storm surge episodes. Associated with these procedures also the calculation of wave runup and inundation levels. This allows to infer in which scale of impact, proposed by Sallenger (2000), is classified each beach profile during

high-energy phenomena. Icarai region presented vulnerability classified as collision regime and overwash regime in almost all sectors and periods.

**Keywords:** Vulnerable zones; storm surge; impact regimes; inundation.

## INTRODUÇÃO

Os processos de inundação costeira impõem sérias ameaças às regiões litorâneas distribuídas pelo globo, causando prejuízos à infraestrutura e danos sociais. 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, além de ser o espaço mais procurado pela sociedade para o desenvolvimento urbano (e.g. complexos hoteleiros, condomínios residenciais e casas de veraneio) (SILVA et al., 2006).

Para alguns autores (NICHOLLS & CAZENAVE, 2010; TORRESAN et al., 2012), as mudanças climáticas em curso podem agravar os problemas de erosão costeira a partir de cenários que considerem os eventos de sobre-elevação do nível do mar (e.g. *storm surges*) e aumento de incidência de tempestades. Esta situação, por sua vez, torna mais forte os efeitos das inundações marinhas, em especial, em áreas mais rebaixadas, provocando múltiplos perigos e desencadeando diversos transtornos sociais (e.g. danos em redes de esgoto, obstrução de estradas e sobrecarga em sistemas elétricos).

As implicações das alterações climáticas em curso (e.g. subida do nível do mar, alterações dos fluxos de matéria e energia em bacias hidrográficas e diminuição da resiliência ambiental) poderão ou já estarão afetando a população mundial e suas atividades nesse reduzido espaço físico.

Os efeitos da pressão humana sobre o litoral levam à perda de resiliência ambiental, bem como, aumento dos impactos costeiros (e.g. erosão de praias, dunas e falésias e a inundação marinha). Além disso, as ressacas do mar

provocadas pela ação individual ou combinada de agentes forçadores naturais, como ondas, ventos e marés, são expressivos causadores de problemas costeiros.

Neste sentido, Council (2013) destacou a problemática das inundações costeiras como uma resultante do processo desordenado de ocupação do litoral, que associado a fatores naturais - as marés astronômicas, as sobre-elevações de procedência meteorológica (*Storm surge*), a subida do nível do mar por conta das alterações climáticas e a ocorrência de Tsunamis - podem provocar danos materiais e imateriais.

Paula (2012) destacou que as ressacas do mar (*storm surge*) ocorrem, na zona costeira do Ceará, quando há empilhamento de massa de água junto à costa, induzido por ventos fortes, ou por ondas de longo período (*Swell*), ou por eventos de índole astronômico ou meteorológico, e até mesmo, por todos estes em um mesmo momento. Como efeito direto desse vento natural pode ocorrer em alguns trechos costeiros o galgamento oceânico de estruturas urbanas (e.g. calçadas e rodovias) e de dunas frontais. Essa situação pode provocar alagamentos costeiros ou inundações marinhas, além de potencializar, em alguns casos, à erosão costeira.

Os fenômenos descritos anteriormente são análogos ao que ocorre no distrito costeiro do Icarai, localizado no município de Caucaia no estado do Ceará, região Nordeste do Brasil. Em que os problemas de erosão costeira são recorrentes, com destruição do patrimônio edificado e construção de obras de proteção costeira (e.g. muros de pedra, dissipador de energia e enrocamentos) (PAULA, 2015).

A importância dos estudos de vulnerabilidade costeira é justificada pelo histórico de ocupação da Praia do Icarai. Desse modo, há necessidade da compreensão dos processos litorâneos atuais para a correta gestão do espaço costeiro e preparação em relação a eventos futuros.

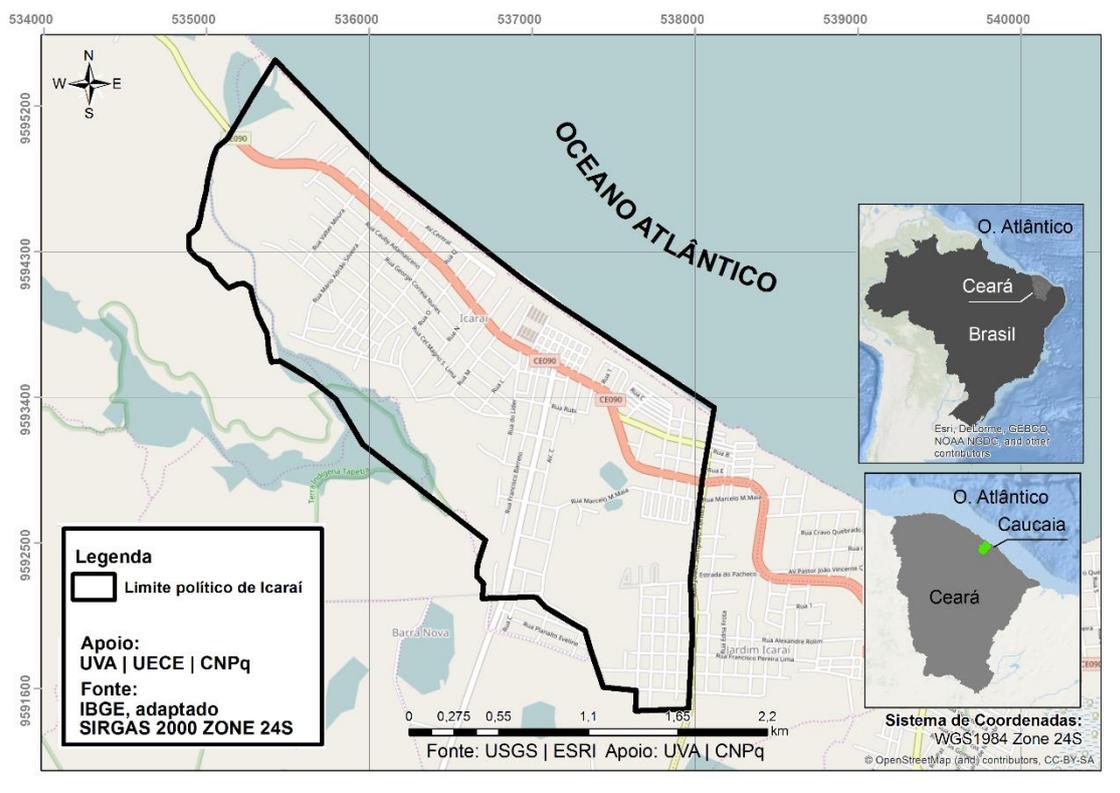
Diante disto, o objetivo desse estudo foi identificar áreas vulneráveis ao longo da frente

marítima urbana e natural do Icaraí durante a ocorrência de 5 diferentes episódios de ressaca do mar. A partir daí, foram determinados os níveis verticais de água (*runup*) utilizando-se a análise das condições oceanográficas, parametrizadas empiricamente pelo que propõem Stockdon et al. (2006).

### ÁREA DE ESTUDO

A região do Icaraí localiza-se no município de Caucaia, região metropolitana de Fortaleza,

capital do estado (Figura 1). Esse distrito costeiro ocupa uma área de 5,45 Km<sup>2</sup> e possui pouco mais de 4 km de linha de costa que estão totalmente afetados pela erosão. A região possui um intenso uso recreativo de suas praias, além de abrigar diversas atividades econômicas e de lazer voltadas ao desenvolvimento comunitário. Esse trecho costeiro teve a formação da malha urbana induzida pelo uso do espaço para o desenvolvimento de uma estância balnear (SILVA et al., 2006).



**Figura 1** – Localização do distrito costeiro do Icaraí em Caucaia (Ceará, Brasil). Fonte: USGS, adaptado, 2015.

A Praia do Icaraí é ocupada principalmente por casas e edifícios próximos à linha de costa, barracas de praia e por obras de engenharia para proteção costeira junto à avenida litorânea ou distribuídas pontualmente ao longo da costa. O espaço ainda é utilizado para prática de esportes náuticos, que se concentram na faixa de mar ou na laguna do rio Barra Nova.

Os problemas erosivos são decorrentes do avanço do mar e de déficits sedimentares, que

aliados à urbanização mal planejada do território e as obras costeiras com diferentes graus de eficiência, provocam um forte desequilíbrio ambiental na região. Como consequência, há uma acentuada desvalorização imobiliária e uma reduzida procura desse litoral para práticas marítimas de lazer e diversão (PAULA et al., 2016).

A região é constantemente atingida por eventos de ressaca do mar que potencializam

alagamentos e inundações e expõem a sociedade civil a diferentes graus de risco (Figura 2). Aliado a isso, problemas de drenagem podem favorecer a redução da eficiência das obras de proteção lá instaladas, causando o colapso da estrutura de contenção e destruindo barracas de praia.



**Figura 2** – Avenida litorânea de Icaraí, sendo alagada durante um evento de ressaca do mar.

Os indutores de ressacas do mar no litoral do Ceará estão ligados à associação de eventos naturais – (a) ondas e maré de sizígia; (b) marés equinociais e ondas (c) vento e maré de sizígia; e (d) ventos, ondas e maré de sizígia. Sendo assim, os dados de agitação marítima foram obtidos do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE).

No monitoramento das condições oceanográficas (ondas, marés e ventos), foi possível identificar a influência da agitação oceânica nas modificações morfológicas dos perfis de praia para os cinco experimentos analisados. A Figura 3 representa as condições sumarizadas.

#### **AGITAÇÃO MARÍTIMA DURANTE OS EVENTOS DE RESSACA DO MAR**

A altura significativa de ondas (Hs) durante o experimento do primeiro semestre de 2014 variou de 1,7 a 2,6 m, com direção predominante NNE/NE (19° a 55°) com média de 1,98m e período médio de ondas de 8,41s. O *Swell* variou de 1,1 m a 2 m, com direção NNE (16° a 25°)

média de 1,59 m. Os ventos predominantes tinham direção ESE/E (81° a 117°), assumindo valores máximos de 9,4 m/s e mínimos de 5,6 m/s. A amplitude de média de maré variou de 2,1 m a 3,1 m durante o mesmo evento. A ressaca do mar foi induzida por ondas e uma maré de sizígia que ocorreu no período.

No experimento que ocorreu no mês de setembro no segundo semestre de 2014 a altura significativa de ondas (Hs) variou de 1,2 m e 2 m, tendo direção predominante ESE/E (95° a 122°), com média de 1,6 m e período médio de ondas com valor de 5,61 s. O *Swell* variou de 0,2 m a 0,7 m, a direção predominante N (360°). A amplitude de maré foi de 2,8 m a 3,1 m durante o evento. A velocidade dos ventos assumiu valores entre 7 m/s e 11,7 m/s, com direção predominante ESE e E (97° a 129°).

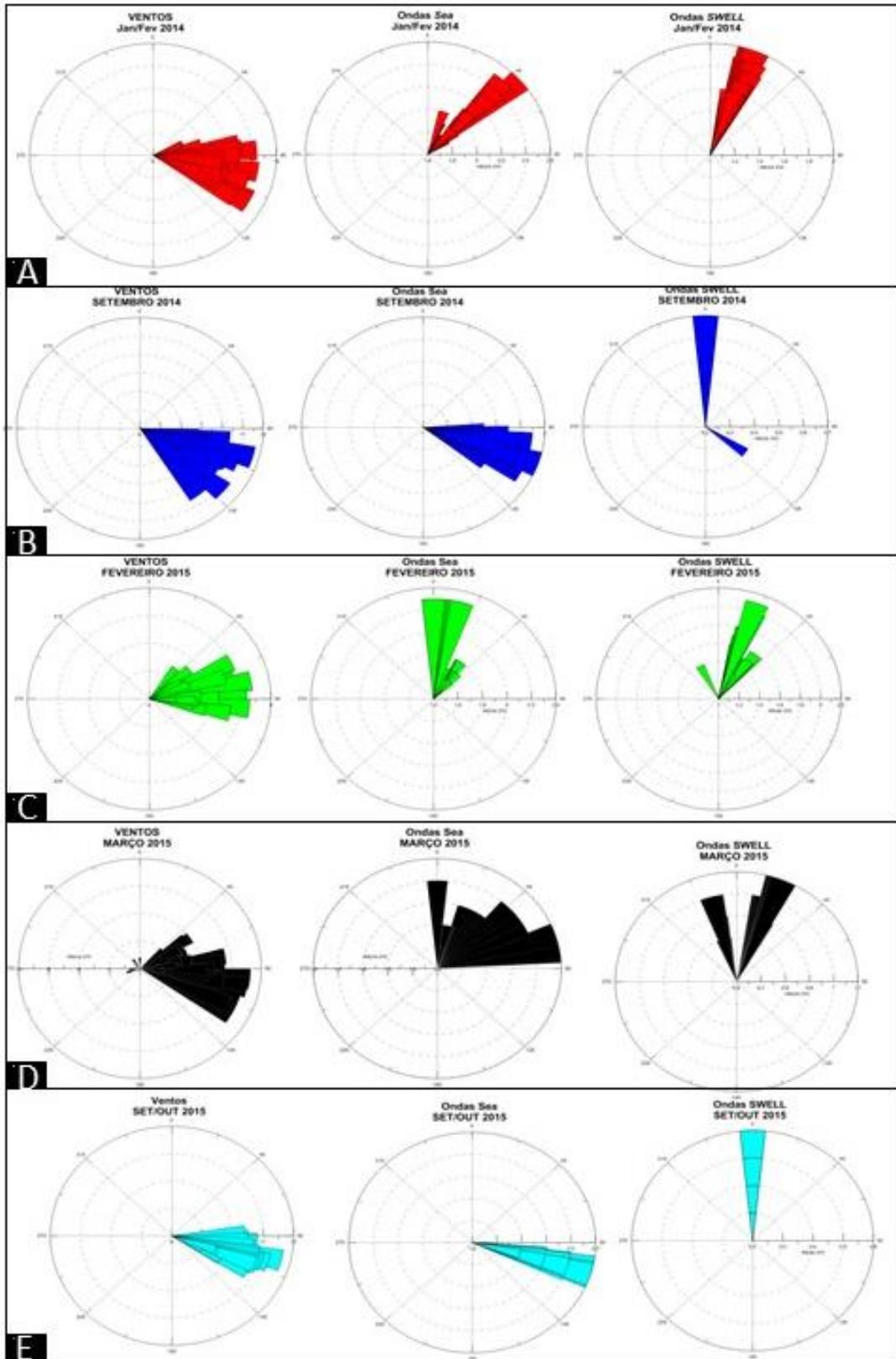
Já no primeiro experimento do primeiro semestre de 2015 que ocorreu em fevereiro, podemos observar o Hs variando de 1,5 m a 2,3 m, tendo como direção predominante N /NNE (360° a 12°), com média de 1,93 m e período médio de ondas de 9,12 s. Os valores máximos e mínimos do swell foram de 1,2 m e 2,1 m, a direção predominante foi NE/NNE (333° a 17°). A velocidade dos ventos atingiu valores entre 4 m/s e 7,3 m/s, com direção predominante ENE/E (38° a 109°).

No experimento que ocorreu no mês de março de 2015 a altura significativa de ondas (Hs) oscilou de 1,4 m e 1,8 m, com orientação predominante ENE/NE (360° a 48°), com média de 1,53 m e período médio de ondas com valor de 8,9 s. As ondas de swell mostraram valores mínimos 0,7 m e máximo 1,1 m com a direção predominante NNE/NNW (348° e 15°). A amplitude de maré foi de 2,9 m a 3,1. A velocidade dos ventos gerou valores entre 2,1 m/s e 9,3 m/s, com direção predominante ENE/E (48° a 360°).

O último experimento ocorreu durante o mês de setembro de 2015 teve Hs máximo de 2,3 m e mínimo de 1,8 m, a direção predominante foi E/ESSE (99° a 109°), com média de 2,12 m e

período médio de onda de 6,3 s. A velocidade dos ventos assumiram valores entre 11,7 m/s e 8,7 m/s, com direção predominante ENE/E (87° a 118°) e velocidade média de 10,24 m/s. O Swell

teve valores mínimos 0,2 m e máximo 0,6 m em direção N (360°). A amplitude de maré variou de 2,8 m a 3,1 m.



**Figura 3** – Direção e intensidade de ondas *sea*, *swell* e ventos durante os 5 eventos de ressacas do mar (A,B,C,D e E). Fonte: CPTEC/INPE, 2015.

### **MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo ora proposto está baseado na metodologia de Sallenger (2000) e Stockdon *et al.* (2006) para identificação de áreas vulneráveis na Praia do Icarai a eventos extremos que condicionem cenários de inundação costeira. Para este fim, foram utilizados 05 experimentos distintos de condição de mar para identificar trechos propensos a diferentes graus de vulnerabilidade. Os cenários foram confeccionados e tratados a partir do cálculo dos níveis verticais de água (*setup*) e do alcance máximo do espraio das ondas (*runup*). Além disso, os cálculos foram sobrepostos aos perfis topográficos das cinco seções de controle demarcados em cada experimento.

Os experimentos ocorreram durante episódios de eventos de alta energia (ressacas do mar) registrado em 5 diferentes datas. O primeiro, entre os dias 28 de janeiro e 09 de fevereiro de 2014, o segundo, no período de 07 a 12 de setembro de 2014, o terceiro, do dia 18 a 22 de fevereiro de 2015, o quarto, do dia 18 a 23

de março de 2015, e o quinto ocorreu entre os dias 26 de setembro e 01 de outubro de 2015.

A escolha da frequência e duração dos monitoramentos foram baseadas no acompanhamento diário das previsões de ondas *swell* do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), além do acompanhamento das tábuas de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN.

A análise das alterações morfológicas induzidas por ressacas do mar foi determinada a partir da execução de 145 perfis topográficos transversais à linha de costa, cuja aferição foi obtida com o uso de uma estação total obedecendo ao método da Estadia de Birkemeier (1981). Aqui, foram determinadas cinco seções de controle (S1, S2, S3, S4 e S5), indicadas na Figura 4, com estruturas morfológicas diferentes no limite da alta praia. Na seção 1, o limite da alta praia é definido por uma duna antropizada; enquanto que entre as seções 2 e 4, a praia é limitada por estrutura rígida de proteção costeira; e na seção 5, o limite é definido por uma duna frontal.



**Figura 4** – Mapa de indicação dos setores de estudo.

O georreferenciamento e a transposição de cotas topográficas para o referencial de nível foram realizados com auxílio de um DGPS (*Differential Global Positioning System*). Todos os perfis praias foram referenciados ao zero hidrográfico (ZH) da DHN.

Para a classificação e identificação dos setores de acordo com a sua vulnerabilidade foi usada uma escala de impactos desenvolvida por Sallenger (2000), que foi elaborada com base na interação entre processos de tempestade e as feições geomorfológicas. Essa escala se baseia em quatro parâmetros: RLOW, RHIGH, DLOW e DHIGH (Figura 5). O RHIGH e RLOW

correspondem, respectivamente, às elevações máximas e mínimas do limite de espraio (*swash*). Os mesmos incluem a sobre-elevação de tempestade ou *storm surge*, a elevação da maré astronômica e o alcance máximo das ondas (*wave runoff*). DLOW e DHIGH correspondem, respectivamente, à base e à crista da duna frontal, isto é, os limites inferiores e superiores do sistema praia-duna. No caso de áreas sem a presença de dunas frontais, o método pode ser adaptado para uma estrutura urbana que esteja no limite superior da praia, como ocorreu em alguns trechos do Icaraí.

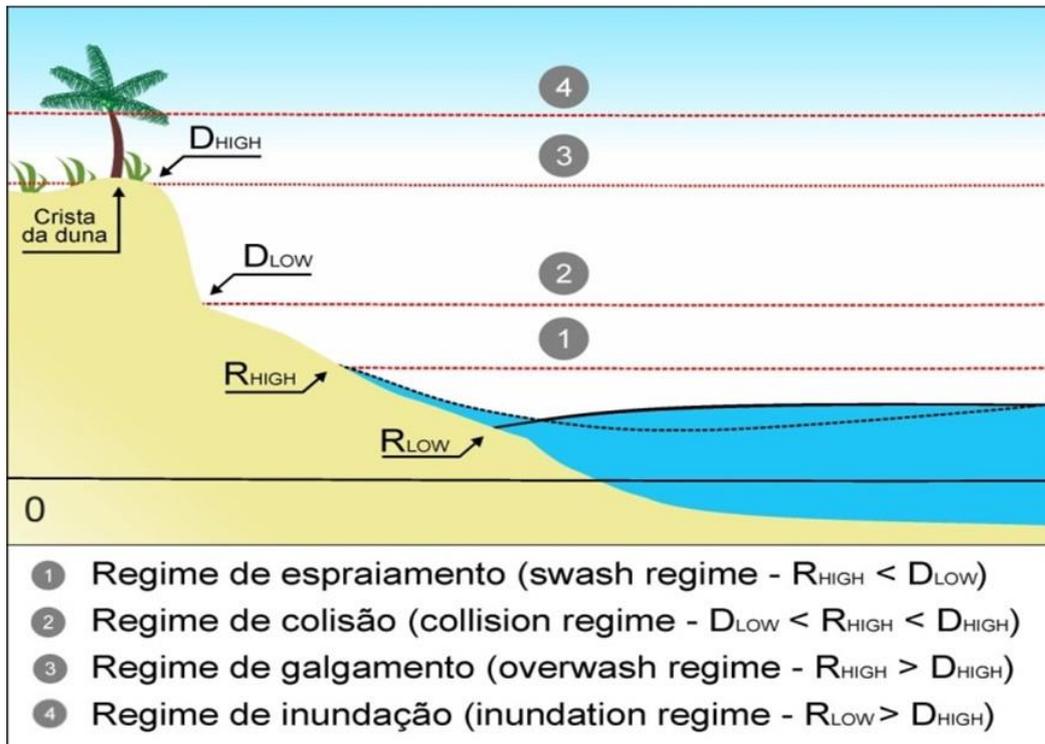


Figura 5 – Escala de impactos, modificada de SALLENGER, 2000.

A escala de impactos de tempestade foi proposta por Sallenger (2000) e Stockdon *et al.* (2006) e possui quatro diferentes regimes: espraiamento (*swash regime*), colisão (*collision regime*), galgamento (*overwash regime*) e inundação (*inundations regime*). Sallenger (2000) agrupou os quatro regimes em níveis máximos de impactos de acordo com sua intensidade.

Para o cálculo do espraiamento da onda (*runup*) e das respectivas cotas de inundação foi utilizada

$$R_2 = 1.1 \left( \frac{0.35 \beta f (HsL)^{1/2} + [HsL(0.563 \beta f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

O alcance máximo das ondas é uma função que depende de várias variáveis, onde o  $\beta f$  é o declive da praia (*beach slope*),  $H_s$  é a altura significativa da onda,  $T$  é o período de onda e  $L$  é o comprimento da onda e é definido pela equação  $L = gT^2/2\pi$ .

A fim de identificar a vulnerabilidade de cada trecho durante os diferentes eventos de ressacas do mar na área de estudo, foram definidos cenários com altura significativa de ondas para diferentes dias e diferentes experimentos de alta

parametrização empírica proposta por Stockdon *et al.* (2006). A equação 1 é parametrizada de acordo com a sobre-elevação (*setup*) induzida pela onda ( $0,35 \beta f (HsL)^{1/2}$ ), o espraiamento incidente (*swash*) ( $0,563 \beta f^2$ ) e as ondas infragravíticas ( $0,004$ ), o mesmo autor sugere que deve ser aplicado a praias intermediárias e reflectivas, caso da área de estudo.

energia. Para determinar o alcance do espraiamento máximo da onda, o *runup* ( $R_{HIGH}$ ), foi procedido cálculo referenciado na equação 2.

$$R_{HIGH} = R_2 + \eta_{mean} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde  $R_2$  é o espraiamento da onda já definido por Stockdon *et al.* (2006) e  $\eta_{mean}$  é o nível médio do mar (*mean sea level*), que é estabelecido pela soma da sobre-elevação meteorológica (*storm surge*) e a maré

astronômica no momento da ressaca do mar. Os dados referentes ao clima de ondas foram disponibilizados pelo CPTEC/INPE. Os valores de preamar de sizígia foram obtidos por consulta a Tábuas de Maré, disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), para os períodos dos experimentos de campo. O valor de *storm surge* foi extraído de Paula (2012) do litoral de Fortaleza, com valor de 0,32m, em virtude da falta de dados para a geração do valor para a área estudada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da investigação e utilização dos dados hidrodinâmicos foram determinados os valores do *runup* da onda para cada evento de ressaca do mar monitorado. Levando em consideração a insuficiência de registros de marés com séries históricas para a região, o valor do *storm surge*, conforme citado anteriormente, foi retirado de Paula (2012). As características oceanográficas usadas para o cálculo do R2 e RHIGH estão agrupadas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Parâmetros para o cálculo do *runup*.

Característica	1°Exp.	2°Exp.	3°Exp.	4°Exp.	5°Exp.
Hs (m)	2,01	1,59	1,93	1,53	2,12
Tp (s)	8,52	5,61	9,12	8,93	6,3
<i>Storm Surge</i>	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Maré (m)	2,98	2,97	3,02	3,0	2,97

Os processos de impactos foram presenciados durante os experimentos de campo, entretanto é de fundamental importância determinar os valores de R2 e RHIGH (Tabela 2). Isto permitiu compreender melhor como é o comportamento morfológico da Praia do Icarai quando da atuação de diferentes eventos de

ressaca do mar. Além disso, as observações de campo e a determinação do *runup* auxiliam no estudo do comportamento do sistema praia-duna e praia-estrutura urbana, especialmente, quando da ação do espraio máximo das ondas sobre estruturas naturais e artificiais.

**Tabela 2** – *Runup* (R2) e máxima elevação do *runup* (RHIGH).

SETOR	1° Exp.		2° Exp.		3° Exp.		4° Exp.		5° Exp.	
	R2 (m)	RHIGH (m)								
<b>S1</b>	1,12	4,42	0,60	3,89	1,14	4,48	0,92	4,24	0,71	3,91
<b>S2</b>	0,91	4,22	0,46	3,75	1,15	4,49	0,92	4,24	0,72	3,91
<b>S3</b>	1,21	4,51	0,6	3,89	1,22	4,56	1,24	4,56	1,51	4,49
<b>S4</b>	1,04	4,34	0,82	4,11	0,96	4,30	0,81	4,13	0,59	3,80
<b>S5</b>	1,68	4,98	0,58	3,87	1,00	4,34	0,80	4,12	1,01	4,17

Vale destacar que os maiores valores do *runup* ocorreram durante as ressacas do 1° semestre de 2014 (4,98m) e de 2015 (4,56m)

nas seções 5 e 3 respectivamente, ou seja, as ressacas do mar que ocorrem no primeiro semestre do ano são induzidas pelo *wave setup*,

as ondas, enquanto que as que possam a vir ocorrer no segundo semestre são induzidas pelo *wind setup* (ventos) (LIMA, 2012).

A região de monitoramento na Praia do Icaraí, em seus cinco setores, foi avaliada de acordo com a vulnerabilidade aos eventos de alta energia segundo a escala de impactos de tempestades proposta por Sallenger (2000) -

espraiamento, colisão, galgamento e inundação. Com esse intuito, levou-se em consideração as características da região, como a declividade da praia ( $\beta_f$ ) e a cota do topo das dunas frontais ou estruturas artificiais (DHIGH) nos cinco setores de monitoramento, para os cinco eventos de ressaca do mar analisados, os valores encontram-se indicados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Declividade da praia ( $\beta_f$ ) e crista da duna (DHIGH).**

Setor	1°		2°		3°		4°		5°	
	$\beta_f$	DHIGH								
<b>S1</b>	0,07	7,51	0,06	7,54	0,07	7,66	0,06	7,51	0,05	7,51
<b>S2</b>	0,05	5,59	0,04	5,59	0,07	5,59	0,06	5,59	0,05	5,59
<b>S3</b>	0,08	4,45	0,06	4,45	0,08	4,45	0,10	4,45	0,132	4,45
<b>S4</b>	0,06	5,19	0,10	5,19	0,05	5,19	0,05	5,19	0,03	5,50
<b>S5</b>	0,13	6,43	0,06	8,56	0,06	8,55	0,05	8,75	0,09	5,79

Os dados gerados se mostraram semelhantes à realidade de campo, possibilitando a avaliação e análise para os experimentos de cada ressaca do mar. Para o primeiro, os dados mostraram que na seção 3, os valores alcançados por RHIGH foram superiores ao DHIGH, ocorrendo assim o regime de galgamento da estrutura (Figura 6). Nesse ponto a altimetria da duna é de 4,45 m, enquanto o *runup* foi de 4,51 m.

Paula (2012) e Donnelly *et al.*, (2006) afirmaram que esse fenômeno ocorre quando a água durante o espraiamento alcança e excede a crista da praia ou a crista da duna, ocorrendo durante eventos extremos. No restante dos setores prevaleceu o regime de colisão frente à estrutura de contenção (S2 e S4) e às dunas frontais (S1 e S5). Isto ocorre quando o esprai

das ondas atinge a base da duna, porém, não a ultrapassa (SALLEGER, 2000). Vale destacar que no setor S5, o espraiamento da onda causou solapamento da base da duna, provocando desmoronamento e o seu recuo em 3,6 m.

Durante o evento de ressaca do mar ocorrido entre os dias 07 e 12/09/2014, as seções 1, 2, 4 e 5 estiveram também expostos ao regime de colisão. Porém, no S3 (região intervencionada por uma obra costeira) o valor do *runup* foi de 3,89 m, entendido como colisão. Entretanto, esse valor não demonstrou de forma realista o que foi observado em campo, pois o ponto sofre muitas modificações devido à obra se encontrar em um estado deteriorado, alterando o perfil praiar. Sendo assim, o modelo não conseguiu se adaptar a esse ponto, onde se pode notar o regime de galgamento em todos os demais experimentos (Figura 7).



**Figura 6** – Registro fotográfico de galgamento no setor (S3) de monitoramento da Praia do Icarai no período de 28/01/2014 a 02/02/2014.

No terceiro experimento, ocorrido durante os dias 18 a 22 de fevereiro de 2015, na seção S3, o valor do *runup* foi de 4,56 m ultrapassando a cota mais alta da estrutura de proteção costeira (DHIGH= 4,45m). Isso levou ao galgamento da estrutura, gerando um processo denominado de *overtopping*, que é um movimento de oscilação vertical da coluna de água junto a uma estrutura urbana.

As demais seções prosseguiram com os mesmos tipos de impactos do evento anterior. Vale destacar, que durante esse evento, as ondas de ressaca do mar danificaram a estrutura de proteção instalada entre as seções 2 e 4, levando ao seu desmoronamento. Essa situação favoreceu a erosão costeira, conseqüentemente, houve um recuo de linha de costa na seção 2 de mais de 15 m (Figura 8).

O quarto experimento ocorrido durante os dias 18 e 23 de março de 2015 se comportou de forma semelhante, sendo detectado o regime de

colisão para as seções S1, S2, S4 e S5 e o regime de galgamento para a seção S3. Já o último evento de ressaca do mar analisado ocorreu durante os dias 26 de setembro e 01 de outubro de 2015, quando também foi observado que o regime de colisão se aplicou a todos os setores desta praia, exceto para a seção 3, onde continuou a prevalecer o regime de galgamento. Vale destacar, ainda, que no setor S1 ocorreu solapamento da base da duna e erosão conforme a Figura 9.



**Figura 7** – Registro fotográfico do regime de galgamento do setor S3 de monitoramento da Praia do Icaraí, o traçado em amarelo destaca o escoamento de água pela via costeira no período 07 a 12/09/2014.

De forma geral, durante os experimentos podemos destacar que as ressacas do segundo semestre são menos energéticas que as do primeiro semestre do ano. Os eventos mais energéticos são induzidos pelo *wave setup*. O regime de impactos que prevaleceu entre os setores durante os cinco eventos observados foi o de colisão. Esse comportamento seguiu um padrão diferente para o setor 3, onde se percebeu em 100% do tempo um regime de galgamento. O comportamento desse setor se deve ao fato de sua instabilidade pelo regime de ondas da região e pelo colapso da estrutura de proteção, que ocasiona diferentes respostas morfológicas. Esses cenários de regime de vulnerabilidade e impactos costeiros podem ser sintetizados na Figura 10.

## CONCLUSÃO

A área de monitoramento se mostrou vulnerável principalmente aos regimes de colisão e de galgamento durante o período das ressacas do mar analisadas. Essas condições foram responsáveis pela erosão de dunas frontais, danos à infraestrutura urbana, desmoronamento da estrutura de engenharia costeira presente na região e variações morfológicas.

O regime de colisão foi observado com maior frequência na maioria das seções de monitoramento (S1, S2, S4 e S5), demonstrando, assim, a vulnerabilidade dos setores a esses episódios de ressaca. O regime de colisão leva

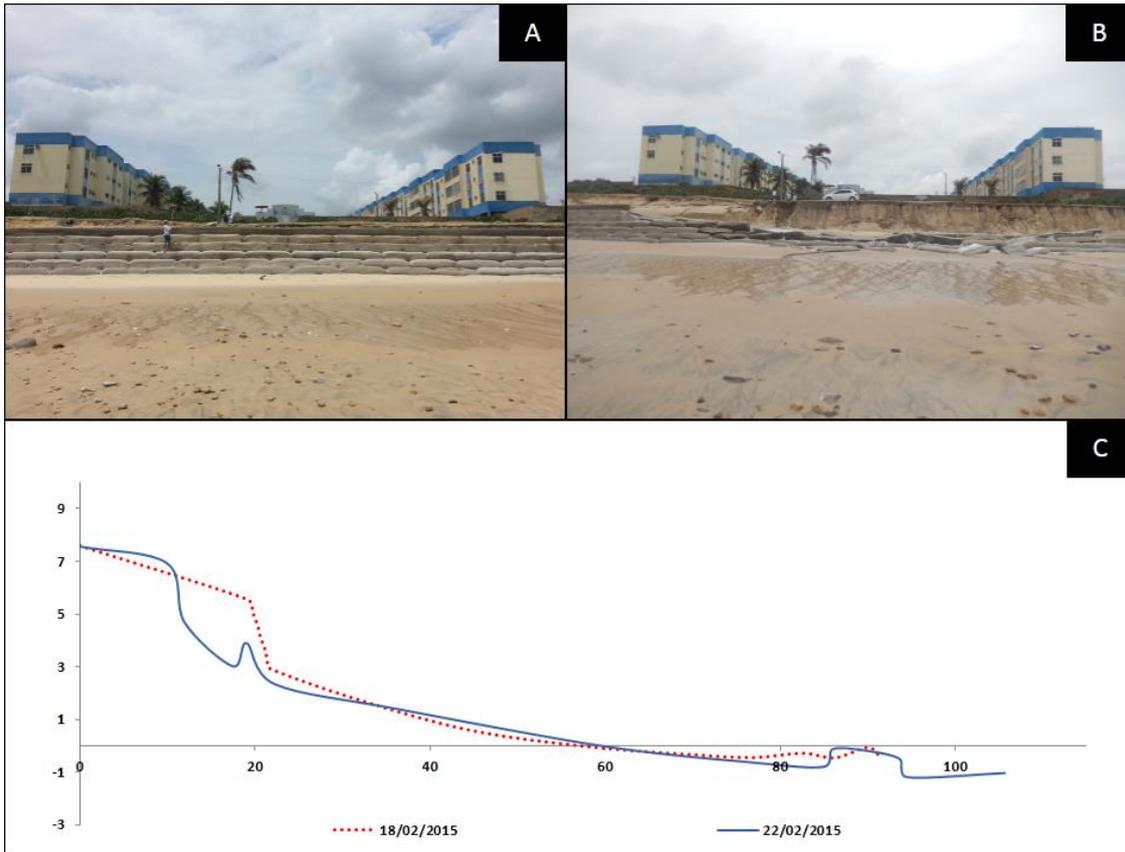
ao solapamento da base das estruturas (dunas e obras rígidas), provocando com o tempo o seu desmoronamento, como ocorreu em todos os casos observados nesse estudo.

A seção 3 foi a mais vulnerável de todas, uma área onde está presente uma estrutura de contenção do avanço do mar que se mostrou ineficiente, pois entrou em colapso várias vezes. O regime preponderante nesse setor foi o galgamento, esse tipo de impactos ocasionou recuo de linha de costa, erosão, danos à infraestrutura urbana da região e o alagamento da via litorânea, levando a sua interdição em alguns momentos.

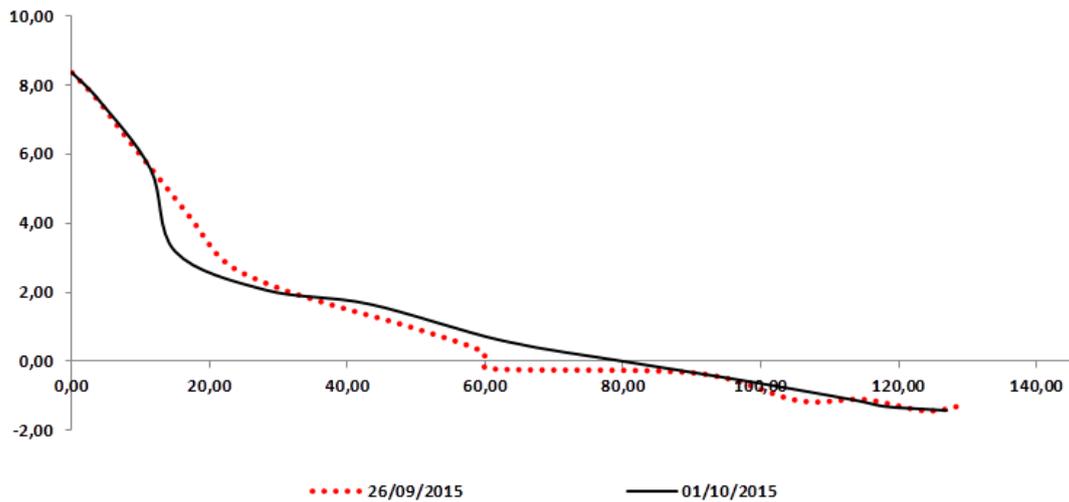
Dito isto, os resultados obtidos são de grande importância para o planejamento costeiro de longo prazo, contribuindo diretamente para os planos de (re) ordenamento do território em risco, bem como, para projeções futuras de impactos costeiros. Isso pode contribuir para a mitigação de riscos associados a eventos de ressaca do mar aos diversos segmentos da sociedade.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento do projeto “Impactos costeiros no litoral de Caucaia (Ceará, Brasil) induzidos pelas obras costeiras construídas a sotamar e pelas ressacas do mar (Processo: 483811/2013-0). A Universidade Estadual Vale do Acaraú pela infraestrutura e apoio na realização do projeto. Aos laboratórios de Oceanografia Geológica da UFC e de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica da UECE pela parceria na realização dos experimentos de campo e análise laboratorial. Ao amigo Rafael Pereira Maciel, pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.



**Figura 8** – Registro fotográfico setor no início da ressaca (A), no último dia (B) e perfil topográfico (C) mostrando as modificações morfológicas ocorridas durante os dias 18 e 22/02/2015.



**Figura 9** – Perfil topográfico do setor S1 entre os dias 26/09/2015 e 01/10/2015.

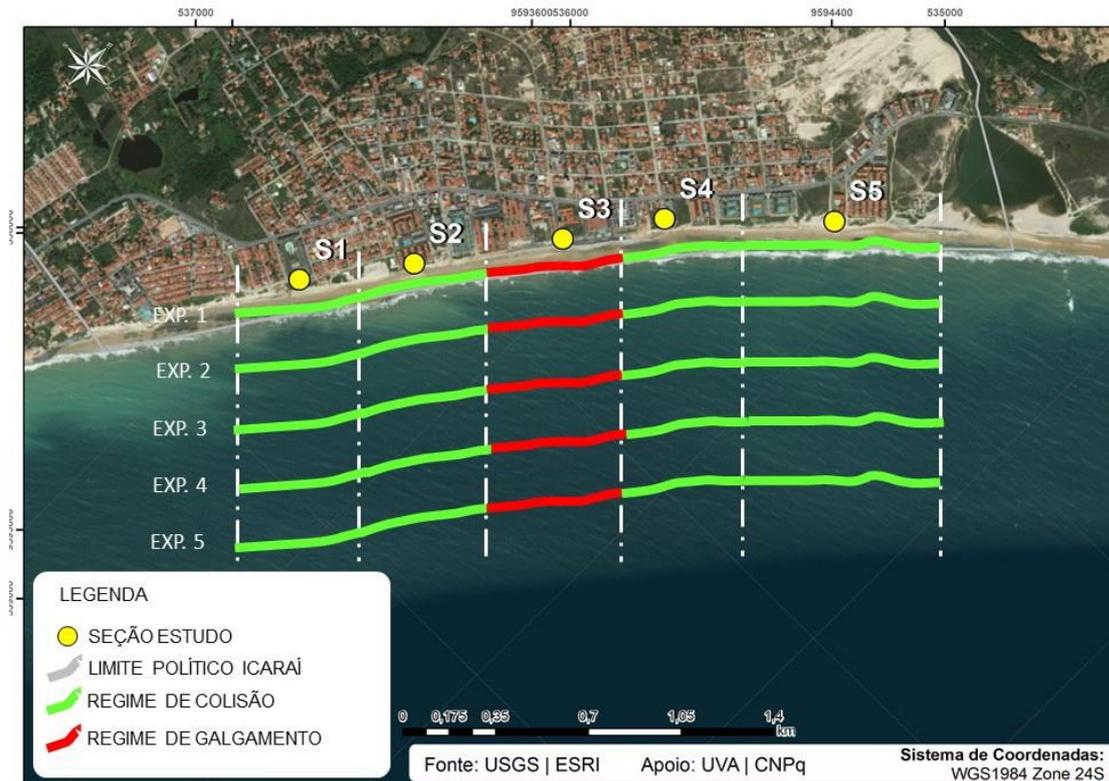


Figura 10 – Mapa de vulnerabilidade da Praia do Icaraí, Caucaia, Ceará, Brasil.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIRKEMEIER, W. A. 1981. *Fast Accurate Two-Person Beach Survey*. Mississippi: Coastal Engineering Technical Aid 81-11. 22 pp.
- COUNCIL, A. 2013 (ver NIWA, 2013).
- CPTEC/INPE – *Centro de previsão de tempo e estudos climáticos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://ondas.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: <2015>.
- DHN (DIRETORIA DE HIDROLOGIA E NAVEGAÇÃO DA MARINHA DO BRASIL). 2014. *Tábua de marés para o ano de 2014, Costa do Brasil*. Rio de Janeiro, Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/>>. Acesso em: 2014.
- DONNELLY, C.; KRAUS, N.; LARSON, M. 2006. State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. *Journal of Coastal Research*, **22**(4): 965-991.
- LIMA, R. S. de. 2012. *Vulnerabilidade da Linha de Costa a Eventos de Alta Energia na Praia da Caponga – Cascavel, Ceará*. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais). Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, 94 pp.
- NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. 2010. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science* **328**(5985): 1517- 1520.
- NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research) 2013. *Coastal Inundation by storm-tides and waves in the Auckland region*. Report prepared for Auckland Council. NIWA ref. HAM2013-059. September 2013
- PAULA, D. P. 2012. *Análise dos riscos de erosão costeira no litoral de Fortaleza em função da vulnerabilidade aos processos geogênicos e antropogênicos*. Tese

- (Doutorado em Ciências do Mar).  
Universidade do Algarve, 364 pp.
- PAULA, D. P. 2015. Erosão costeira e estruturas de proteção no litoral da região metropolitana de Fortaleza (Ceará, Brasil): um contributo para artificialização do litoral. *Revista eletrônica do PRODEMA*, **9**: 73-86.
- PAULA, D. P. DE; LIMA, J. W. S. DE; GONDIM, R. L.; MOUTA JÚNIOR, A. W. A.; MONTEIRO, N. V. A.; CAMPOS, F. M.; DIAS, J. A. 2016. Percepção da erosão costeira na Praia do Icará (Caucaia - CE, Brasil) usando a resposta cognitiva dos atores sociais. In: Luis Cancela Fonseca, Ana Catarina Garcia, Sílvia Dias Pereira e Maria Antonieta C. Rodrigues (Eds.) *Entre rios e mares: um património de ambientes, história e saberes – Tomo V da Rede BrasPor*. Rio de Janeiro: Corbã Editora Artes Gráficas Ltda., pp.149-161.
- SALLENGER, A. H. 2000. Storm impact scale for Barrier Island. *Journal Coastal Research*, **16**: 890-895.
- SILVA, J. B.; DANTAS, E. W. C.; MEIRELES, A. J. A (Orgs.) 2006. *Litoral e sertão, natureza e sociedade no nordeste brasileiro*. Fortaleza: Expressão Gráfica, 408 pp.
- STOCKDON, H. F.; HOLMAN, R. A.; HOWD, P. A.; SALLENGER, A. H. 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, **53**(7): 573-588.
- TORRESAN, S.; CRITTO, A.; RIZZI, J.; MARCOMINI, A. 2012. Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the North Adriatic Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **12**: 2347–2368.
- USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). Earth explorer. United States Geological Survey. 2015. Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/> >. Acesso em: < jun. 2015>.