



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS

RHAIANE RODRIGUES DA SILVA

EVOLUÇÃO E VULNERABILIDADE DAS FALÉSIAS NA COSTA LESTE DO
CEARÁ-NORDESTE DO BRASIL

FORTALEZA

2021

RHAIANE RODRIGUES DA SILVA

EVOLUÇÃO E VULNERABILIDADE DAS FALÉSIAS NA COSTA LESTE DO
CEARÁ-NORDESTE DO BRASIL

Tese apresentada a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em Ciências Marinhas Tropicais. Área de Concentração: Dinâmica de processos ambientais costeiros e oceânicos. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Lidriana de Souza Pinheiro.

Supervisor estrangeiro: Prof. Dr. José A. Jiménez.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S583e Silva, Rhaiane Rodrigues da.
EVOLUÇÃO E VULNERABILIDADE DAS FALÉSIAS NA COSTA LESTE DO CEARÁ-NORDESTE DO BRASIL / Rhaiane Rodrigues da Silva. – 2021.
160 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Lidriana de Souza Pinheiro.

1. Falésias. 2. LiDAR. 3. Litoestratigrafia. 4. LOE. 5. Vulnerabilidade. I. Título.

CDD 551.46

RHAIANE RODRIGUES DA SILVA

EVOLUÇÃO E VULNERABILIDADE DAS FALÉSIAS NA COSTA LESTE DO
CEARÁ-NORDESTE DO BRASIL

Tese apresentada a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em Ciências Marinhas Tropicais. Área de Concentração: Dinâmica de processos ambientais costeiros e oceânicos. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Aprovada em: 05/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Lidriana de Souza Pinheiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José A. Jiménez
Universidad Politècnica de Catalunya (UPC)

Prof.^a Dr.^a Luci Cajueiro Carneiro Pereira
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Prof. Dr. Paulo Henrique de Sousa Gomes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Jeovah de Andrade Meireles
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rubson Pinheiro Maia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico à Universidade Federal do Ceará.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Ceará, que nos últimos dez anos (2011-2021) ajudou minha formação como cidadã, pessoa, aluna e professora que sou hoje. Graças ao ensino público, gratuito e de qualidade pude desenvolver minhas aptidões e ter acesso ao conhecimento e educação. Aprendi a não desistir, ter pensamento crítico, lutar pelos meus sonhos, objetivos e me adaptar às diversas situações que aparecem pelo caminho.

Nesses anos de Universidade, além da grade curricular, tive bolsas de iniciação acadêmica e científica, fiz campos para diversos locais do Ceará e fora dele, participei de inúmeros congressos científicos pelo Brasil e finalizei com um intercâmbio internacional pra Espanha.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por todas as bolsas nos últimos 6 anos, somando mestrado, doutorado e doutorado sanduíche. O financiamento estudantil é de vital importância para o desenvolvimento do país, apesar do sucateamento que estamos vendo com a ciência brasileira atualmente, seguimos fortes.

Uma parte muito importante a ser destacada nessa jornada foram os 8 anos de LGCO (Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica) na nossa querida e amada UECE (Universidade Estadual do Ceará). Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Jäder Onofre de Moraes pela oportunidade de desenvolver minha pesquisa acadêmica no LGCO e me inserir no seu grupo de pesquisadores.

Foram 10 anos duros, sendo os últimos quatro mais intensos de toda minha vida. Passei por crises de ansiedade, início de depressão, crises de gastrite, perdi um amor, me reergui, fiz uma cirurgia de emergência, campos exaustivos, intercâmbio pra Colômbia, cortes de bolsa, doutorado sanduíche na Espanha, encontrei um novo amor e pra finalizar uma pandemia mundial.

Nunca imaginei que minha defesa fosse acontecer dessa forma, apresentando em uma sala sozinha para várias pessoas acompanhando online. Sempre imaginei como seria o dia da defesa, quando alcançaria o diploma mais alto que qualquer aluno pode conquistar no Brasil. O sentimento que tenho hoje é de dever cumprido. Sinto que fiz o meu melhor nas condições que tinha com muita dedicação e amor à profissão e às ciências do mar.

Esse período não foi fácil, por isso agradeço as pessoas que estiveram e ainda estão ao meu lado. Que me acompanharam na superação de cada etapa. Minha orientadora

que desde 2012 trabalhamos juntas, Professora Lidriana Pinheiro. Meu supervisor no doutorado sanduíche na Universidade Politécnica da Catalunha, Prof. Dr. Jose Jimenez, que me recebeu sempre tão gentil e solícito desde o primeiro e-mail, por todo o intercâmbio em Barcelona até a defesa.

A minha família acompanhou as dificuldades da graduação, mestrado e doutorado. Meus pais, Marcio Rodrigues e Tereza Cristina que participaram diretamente, colaboraram com os campos e com minha pesquisa. Aos amigos acadêmicos que ganhei ao longo do percurso e claro aos companheiros de laboratório que sempre estenderam a mão quando precisava, em especial Antônio Rodrigues Ximenes Neto, Eduardo Lacerda Barros e David Hélio Miranda de Medeiros.

Ao LABOMAR (Instituto de Ciências do Mar) e aos companheiros do LOG (Laboratório de Oceanografia Geológica) do LABOMAR/UFC, em especial aos Oceanógrafos Isaias Farias da Câmara, Kevin Samuel Felix Lima, Francisco Jailton Nogueira Silva Filho e Regimário Pereira Lima Filho que estiveram ao meu lado nos anos de doutorado, colaborando com minha pesquisa.

A todos que passaram por minha vida nesse período e colaboraram para que eu pudesse chegar aqui hoje, meus sinceros agradecimentos.

Muito obrigada a todos.

RESUMO

As falésias são feições geomorfológicas com topo aplainado e vertentes escarpadas presentes na zona costeira em grande parte do mundo, variando sua composição em rochosa, calcária, de gelo e sedimentar. As falésias sedimentares costeiras estão presentes no litoral brasileiro associadas a Formação Barreiras. Com as mudanças climáticas os processos de erosão de falésias e notícias de desmoronamento próximas a áreas urbanas estão se tornando mais recorrentes. Com isso, o trabalho visa preencher lacunas referente às características geológicas e sedimentológicas das falésias, mapear os pontos que apresentam maiores vulnerabilidades a eventos de alta energia e fazer previsões para o futuro, apresentando dados pioneiros e uma metodologia replicável. Com a hipótese de que as falésias cearenses possuem litologia distinta da Formação Barreiras, de origem miocênica, são mais arenosas e vulneráveis em locais onde há uma maior movimentação de usuários. Para isso foram utilizadas imagens LiDAR 3D, coletas de amostras sedimentares das falésias para análises granulométricas, geoquímicas (fluorescência de Raios-X) e cronológica (Luminescência Opticamente Estimulada - LOE), em três praias significativas do ponto de vista de uso e ocupação no leste do Ceará (Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí). Os resultados foram divididos em 3 partes em formatos de artigos científicos, sendo o primeiro deles publicado na revista Geociências em 2020 e outros dois em processo de finalização e submissão para revistas internacionais, por isso o último está escrito em inglês. Os resultados mostram que 40% da linha de costa do leste cearense é composta por falésias ativas e paleofalésias areno argilosas com sedimentos pobremente selecionados e composição geoquímica de silício (72%), alumínio (13%), potássio (6%) e ferro (3%), indicando origem terrígena e deposição fluvial em um período glacial mais quente com nível do mar 20m abaixo do atual (IMC 5c). Essa deposição ocorreu entre 49.000 ± 3.260 anos e 95.850 ± 5.500 anos antes do presente, e de acordo com a cronologia, estão inseridas nos Estágios Isotópicos Marinhos 3 e 5c. Além disso, nelas observamos feições morfológicas que indicam escoamento superficial (voçorocas), diferenças litológicas e neotectônica (patamares escalonados) e forte erosão subárea (erosão remontante), além de taxas de erosão marinhas em 5% da área de estudo superando 1 m/ano e em 13% ficando entre 0.24 e 1 m/ano. Isso se dá devido ao seu potencial erosivo frente aos fatores meteoceanográficos, por isso, as falésias arenosas ativas apresentaram 80% de vulnerabilidade alta ou muito alta, destacando quatro *hotspots* erosivos nas praias de Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia e Retirinho. Esses pontos são destacados para a tomada de decisão da gestão costeira local, atenção do poder público, evitar acidentes graves e para estudantes e comunidade científica seguir e aprofundar os estudos no tema.

Palavras-chave: Falésias; LiDAR; Litoestratigrafia; LOE; Vulnerabilidade.

ABSTRACT

The cliffs are geomorphological features with a flat top and steep slopes present in the coastal zone of the world, varying their composition in rocky, limestone, ice and sedimentary. Coastal sedimentary cliffs are present on the Brazilian coast associated with the Barreiras Formation. With climate change, the processes of erosion of cliffs and reports of landslides near urban areas are becoming more recurrent. With this, the work aims to fill gaps regarding the geological and sedimentological characteristics of the cliffs, map the points that present greater vulnerabilities to high energy events and make predictions for the future, presenting pioneering data and a replicable methodology. With the hypothesis that the Ceará cliffs have a distinct lithology from the Barreiras Formation, of Miocene origin, they are sandier and more vulnerable in places where there is a greater movement of users. For this, 3D LiDAR images were used, collection of sedimentary samples from the cliffs for granulometric, geochemical (X-ray fluorescence) and chronological (Optically Stimulated Luminescence - OSL) analysis, in three significant beaches from the point of view of use and occupation in the east Ceará (Morro Branco, Canoa Quebrada and Icapuí). The results were divided into 3 parts in scientific article formats, the first being published in the Geosciences journal in 2020 and the other two in the process of being finalized and submitted to international journals, so the last one is written in English. The results show that 40% of the east coast of Ceará is composed of active cliffs and sandy clayey paleocliffs with poorly selected sediments and geochemical composition of silicon (72%), aluminum (13%), potassium (6%) and iron (3%), indicating terrigenous origin and fluvial deposition in a warmer glacial period with sea level 20m below the current one (ICM 5c). This deposition occurred between $49,000 \pm 3,260$ years and $95,850 \pm 5,500$ years before the present, and according to the chronology, they fall within the Marine Isotopic Stages 3 and 5c. In addition, in them we observed morphological features that indicate surface runoff (gullies), lithological and neotectonics differences (stepped surface) and strong subarea erosion (remounting erosion), in addition to marine erosion rates in 5% of the study area exceeding 1 m/yr and in 13%, between 0.24 and 1 m/yr. This is due to their erosive potential in the face of met oceanographic factors, so the active sandy cliffs presented 80% of high or very high vulnerability, highlighting four erosive hotspots on the beaches of Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia and Retirinho. These points are highlighted for the decision-making of local coastal management, attention of the public authorities, avoiding serious accidents and for students and the scientific community to follow and deepen studies on the subject.

Keywords: Cliffs; LiDAR; Lithostratigraphy; LOE; Vulnerability.

RESUMEN

Los acantilados son características geomorfológicas de topo plano y fuertes pendientes presentes en la zona costera en gran parte del mundo, variando su composición en rocoso, calizo, hielo y sedimentario. Los acantilados sedimentarios costeros están presentes en la costa brasileña asociados con la Formación Barreiras. Con el cambio climático, los procesos de erosión de acantilados y reportes de deslizamientos de tierra cerca de áreas urbanas son cada vez más recurrentes. Con ello, el trabajo pretende llenar vacíos en cuanto a las características geológicas y sedimentológicas de los acantilados, mapear los puntos que presentan mayor vulnerabilidad ante eventos de alta energía y realizar predicciones de futuro, presentando datos pioneros y una metodología replicable. Con la hipótesis de que los acantilados de Ceará tienen una litología distinta de la Formación Barreiras, de origen Micénica, son más arenosos y vulnerables en los lugares donde hay mayor movimiento de usuarios. Para ello se han utilizado imágenes LiDAR 3D, recogida de muestras sedimentarias de los acantilados para análisis granulométrico, geoquímico (fluorescencia de rayos X) y cronológico (Luminiscencia Estimulada Ópticamente - LOE), en tres playas significativas desde el punto de vista de uso y ocupación en el este, Ceará (Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí). Los resultados se dividieron en 3 partes en formatos de artículo científico, siendo la primera publicada en la revista Geociencias en 2020 y las otras dos en proceso de finalización y enviadas a revistas internacionales, por lo que la última está escrita en inglés. Los resultados muestran que el 40% de la costa este de Ceará está compuesto por acantilados activos y paleo acantilados areno arcillosos con sedimentos mal seleccionados y composición geoquímica de silicio (72%), aluminio (13%), potasio (6%) y hierro (3%), indicando origen terrígeno y deposición fluvial en un período glacial más cálido con nivel del mar 20 m por debajo del actual (IMC 5c). Esta deposición se produjo entre 49.000 ± 3.260 años y 95.850 ± 5.500 años antes del presente, y según la cronología se enmarcan en las Etapas Isotópicas Marinas 3 y 5c. Además, en ellos se observaron rasgos morfológicos que indican escorrentía superficial (grietas), diferencias litológicas y neotectónicas (niveles escalonados) y fuerte erosión subárea (erosión de remontado), además de tasas de erosión marina en el 5% del área de estudio superiores a 1 m/año y en un 13%, entre 0,24 y 1 m/año. Esto se debe a su potencial erosivo frente a factores meteoceanográficos, por lo que los acantilados de arena activa presentaron 80% de vulnerabilidad alta o muy alta, destacándose cuatro focos erosivos en las playas de Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia y Retirinho. Estos puntos se destacan para la toma de decisiones de manejo costero local, atención de las autoridades, evitar accidentes graves y para que los estudiantes y la comunidad científica sigan y profundicen estudios sobre el tema.

Palabras Clave: Acantilados. LiDAR; Litoestratigrafía. LOE. Vulnerabilidad.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa de localização da zona costeira analisada no trabalho, destacando as 3 principais praias com falésias arenosas no litoral leste do Ceará (Nordeste do Brasil), indicando seu nível de ocupação: Baixa (Icapuí), média (Morro Branco) e alta (Canoa Quebrada). 22
- Figura 2 - Gráfico da média histórica de distribuição da precipitação em um ano na praia de Canoa Quebrada, Aracati. Sinalizando os meses de março e abril mais chuvoso é entre agosto e novembro com pouco ou quase nenhum registro de precipitação. 23
- Figura 3 - Classificação das falésias costeiras em ativas, inativas e paleofalésias. 33
- Figura 4 - Perfil das escarpas das falésias de acordo com a erosão marinha (M) e erosão subaérea (Sa). 35
- Figura 5 - Modelagem do perfil das falésias de acordo com as variações de nível do mar. 35
- Figura 6- Sulcos, ravinas e voçorocas em falésias arenosas semiconsolidadas, no qual as voçorocas estão sinalizadas com uma linha pontilhada, as ravinas com linhas e os sulcos com setas pretas. Além disso, é sinalizado a presença de pipings na escarpa das falésias, sinalizados com círculos. 38
- Figura 7- Solapamento com linhas pontilhadas nas falésias que possui base de arenitos cimentados e topo arenoso, formando uma pequena caverna e indicando uma área de risco neste local. A foto é de um ponto nas falésias da praia de Morro Branco, Ceará. 39
- Figura 8- Movimentos de massa classificados em queda de blocos, fluxo e escorregamento (Planar e rotacional). 40
- Figura 9- A) Estratigrafia de depósitos resultantes de desmoronamentos pretéritos na praia de Morro Branco (Beberibe, CE); B) Linhas estratigráficas dos antigos desmoronamentos marcados na base das falésias. 41
- Figura 10- Mapa de localização da área de estudo, os municípios do litoral leste do Ceará que possuem falésias (Cascavel, Beberibe, Fortim, Aracati e Icapuí), identificando as áreas de falésias ativas, paleofalésias, pontos que possuem voçorocas e as principais praias citadas no estudo. 50
- Figura 11- Falésias ativas do litoral leste do Ceará nas praias de A- Morro Branco (Beberibe); B- Pontal de Maceió (Fortim); C- Canoa Quebrada (Aracati) e D- Ponta Grossa (Icapuí). 55
- Figura 12- Perfis topográficos das falésias ativas (unidades de medida em metros e em graus) nos municípios de Beberibe (mb), Fortim (ftm), Aracati (cq) e Icapuí (icp), indicando o início e final do perfil topográfico de cada praia. 57
- Figura 13- Perfis topográficos nas paleofalésias no litoral leste do Ceará, nos municípios de Cascavel (ccv), Beberibe (mb) e Icapuí (icp), utilizando imagens do Lidar e indicando o início e final do perfil topográfico. Detalhando a escarpa das falésias inativas que estão a distâncias de um quilômetro da linha de costa e imagens in loco dos locais. 59
- Figura 14- Área das voçorocas em imagem lidar nas praias de A- Canoa Quebrada (Aracati) e B- Morro Branco (Beberibe). 61
- Figura 15- Imagens das paleofalésias no litoral leste do Ceará, nas praias de A- Uruaú (Beberibe); B- Barra Nova (cascavel); C- na região de Requenguela (Icapuí), onde estão as falésias mais distantes da linha de costa; D - Redonda (Icapuí). 63
- Figura 16- Patamar escalonado na praia de Redonda (Icapuí), mostrando a erosão diferenciada das camadas superior e inferior, as voçorocas no topo da camada superior de perfil mais suavizado e solapamento na base da falésia ativa da camada inferior de perfil mais escarpado. 66

Figura 17- Localização das oito amostras sedimentares dispostas na linha de costa da praia de A- Morro Branco com a localização das amostras Mb1, Mb2 e Mb3; B- Canoa Quebrada com a localização da amostra CQ e C- Icapuí com a escarpa da falésia localizando onde foram coletadas as amostras ICP1, ICP2 e ICP3 (sendo esta última a única representante da Formação Barreiras). 74

Figura 18- Coleta de amostras para datação por LOE (Luminescência Opticamente Estimulada); A- escolha do local para a coleta onde não poderia ter cicatriz de desmoronamento; B- Raspagem superficial e inserção do tubo de PVC com ajuda de um martelo; C- retirada do tubo com cuidado para não contaminar a amostra; D- Amostras em tubos de PVC de 5 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento prontas para serem enviadas para a análise. 77

Figura 19- Análise das amostras coletadas nas falésias e analisadas em laboratório. Acondicionamento das amostras brutas em cadinhos; B- Lavagem das amostras para a separação dos sedimentos mais finos (silte e argila) com uma peneira de malha de 0,062 mm sob água corrente, vale ressaltar que foi colocado um balde no fundo da pia para análise de pipetagem. C- Peneiramento seco, para separar cada fração de acordo com a malha da peneira e posterior análise; D- A análise granulométrica de silte e argila por pipetagem. 79

Figura 20- Gráfico de frequência acumulada das amostras de granulometria das falésias do litoral leste do Ceará, coletadas em Morro Branco (Mb3), Canoa Quebrada (CQ) e Icapuí (ICP1 e 2), confrontadas com a da Formação Barreiras (ICP3). 84

Figura 21- Resultado do arredondamento e esfericidade dos grãos com a classificação granulométrica A- areia muito fina; B- areia fina; C- areia média; D- areia grossa; E- areia muito grossa e F- grânulos nas falésias nas falésias de Morro Branco (MB3), Canoa Quebrada (CQ) e Icapuí (ICP2). 86

Figura 22- Resultado do revestimento dos grãos com a classificação granulométrica grânulos, areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina das falésias de Icapuí (ICP2) analisadas em grãos brutos (A, B) e depois de lavados (C, D). A- Areia média bruta; B- Areia grossa bruta; C- Areia média lavada e D- Areia grossa lavada. 87

Figura 23 – A- Película ferruginosa encontrada nas falésias do patamar superior na praia de Icapuí (ICP 2); B- Falésias de Icapuí onde é possível ver na escarpa da falésia onde está circulado uma capa de sedimentos mais escuros; C- Falésias de Morro Branco onde também está presente uma película ferruginosa na escarpa. 90

Figura 24- A- Estratigrafia do pacote sedimentar das falésias na praia de Morro Branco; B- Imagem da escarpa das falésias identificando onde foram coletadas as amostras sedimentares e a amostra para análise de LOE; C- Perfil topográfico identificando a base e o topo. 93

Figura 25- A- Estratigrafia do pacote sedimentar das falésias de Canoa Quebrada identificando a posição da coleta de amostra LOE; B- Imagem da escarpa das falésias com cicatriz de desmoronamento, base solapada com presença de embarcações; C- Perfil topográfico indicando o topo, a base e a coleta sedimentar. 94

Figura 26- A- Perfil estratigráfico das falésias na praia de Peroba (Icapuí); B- Foto no local do patamar escalonado onde podemos ver claramente a diferença entre as escarpas superior e inferior; C- Perfil topográfico das falésias de Icapuí. 95

Figura 27- Diferença de coloração (branca e laranja) nos sedimentos das falésias de A- Patamar superior no Icapuí e B- em Morro Branco, onde existe uma linha de coloração avermelhada entre os sedimentos arenosos superiores e a Formação Tibau na base. Também podemos ver a coloração alaranjada nas areias do estrâncio, no qual, a foto foi

- feita no período chuvoso, comprovando a importância dos sedimentos das falésias para a retroalimentação sedimentar da praia. 100
- Figura 28- Eventos de deposição sedimentar registrados na costa leste do Ceará em relação à curva de variação do nível do mar global fornecida em Shackleton (1988), e os Estágios Isotópicos Marinheiros (EIM). 104
- Figura 29- Eventos de deposição sedimentar registrados no Nordeste do Brasil em relação à curva de variação do nível do mar global fornecida em Shackleton (1988), e os Estágios Isotópicos Marinheiros (EIM). 108
- Figura 30- Location of the study area in which the methodology was applied, identifying the profiles, the beaches mentioned in the study and the inactive cliff area in the eastern sector. 115
- Figura 31- Result of the vulnerability of the variables a) Litology, b) Cliff Slope, c) Distance Shoreline, d) Shoreline change and e) Coastal Defenses. The points were classified as very low (Blue), low (Green), moderate (Yellow), high (Orange) and very high (Red). In addition, dunes, rivers and cities were identified in the image, in areas that did not have cliffs). Showing the erosion cliffs hotspots. 126
- Figura 32 – Map of the separated variables in the 4 zones of the east coast of Ceará (A1 Morro Branco/Praia das Fontes, B2 Pontal de Maceió, C3 Aracati-Canoa Quebrada and D4 Icapuí), showing the results of the variables a) Lithology, b) cliff slope, c) distance to shoreline, d) shoreline change, and e) Coastal Defenses, Coastal Sensitivity Index (CSI) and cliff erosion rate according to vulnerability level, very low (blue), low (green), moderate (yellow), high (orange) and very high (red). Showing the cliff erosion hotspots on the beaches of Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia and Retirinho. 127
- Figura 33- (a) An example of a high vulnerability cliff composed of a consolidated sandstone base and upper semi-consolidated package, exposing a shore platform on the beach of Morro Branco (Tibau formation at the base and Barreiras Indiviso at the top). (b) An example of a profile with low vulnerability coast composed of conglomerates resistant sediments, on the beach of Peroba, Icapuí (Barreiras Formation at the base and Barreiras Indiviso at the top). With the presence of foredunes at the foot cliffs as coastal defenses. 132
- Figura 34- A- Collapsing blocks in sandstone cliffs more resistant composition in beach Redonda, Icapuí. This point was classified as high vulnerability. B- An example of the collapse points of semi-consolidated sediments from the top of the cliff caused by continuous marine actions at its base, on the beach of Canoa Quebrada. This point was classified as a very high vulnerability, the most critical zone. 133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Demanda turística nos principais municípios do litoral leste do Ceará.	30
Tabela 2 -Evolução da demanda turística no litoral leste referente aos municípios de Beberibe, Aracati e Icapuí.	30
Tabela 3- Mapeamento, características morfológicas e litológicas das cinco áreas pesquisadas nas falésias costeiras. Identificando Ac como Falésias ativas e Pc como Paleofalésias.	54
Tabela 4- Descrição das 22 amostras coletadas nas praias de Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí, o nome destinado a cada amostra, a descrição, formação geológica, caráter.	76
Tabela 5- Composição química dos sedimentos das falésias do litoral Leste do Ceará. Praia de Morro Branco (MB1, MB2, Mb3), Canoa Quebrada (CQ) e Praia de Peroba-Icapuí (ICP1, ICP2 e ICP3). Sendo a Formação Barreiras representada pelo ICP3.	88
Tabela 6- Correlação de todos os elementos encontrados nas amostras dos sedimentos nas falésias do litoral leste do Ceará (nas praias de Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí).	89
Tabela 7- Resultados das porcentagens de óxidos das amostras das falésias, da Formação Barreiras e de uma película ferruginosa encontrada na escarpa das falésias de Peroba (Icapuí).	89
Tabela 8- Resultado das datações LOE nas falésias do leste do Ceará (Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí).	91
Tabela 9 - Coastal sensitivity index classes created for the Ceará cliff coast. The color scheme depicts the level of sensitivity with blue indicating very low sensitivity while red indicates very high sensitivity.	116
Tabela 10- Result in percentage of active and inactive cliffs (distant to 100 meters from the current shoreline free of anthropic barriers), according to the vulnerability classification of the variables. Result in percentage the CSI (Coastal Sensitivity Index) and the erosion rate cliff's top in the period 2004-2019.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EIM	Estágio Isotópico Marinho
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GNSS	Sistema de Navegação Global por Satélite
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Ka	Milhares de anos
LGCO	Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica
LIDAR	Light Detection and Ranging
LOE	Luminescência Opticamente Estimulada
LRX	Laboratório de Raios-X
Ma	Milhões de anos
RTK	Real Time Kinematic
SEMACE	Superintendência Estadual de Meio Ambiente
UECE	Universidade Estadual do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZEE	Zoneamento Econômico Exclusivo

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, ANTECEDENTES E JUSTIFICATIVA.	17
1 INTRODUÇÃO GERAL	17
2. OBJETIVO	21
2.1 Objetivo Geral	21
2.2 Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	21
3.1 Meteoceanográficos	22
3.2 Geológicas e Geomorfológicas	25
3.3. Antrópicos	27
3.3.1 População	28
3.3.2. Turismo	29
3.4 Proteção ambiental.	31
CAPÍTULO III - REFERENCIAL TEÓRICO	33
4.1 Falésias	33
4.1.1 Morfologia	34
4.2 Processos erosivos em falésias arenosas	36
4.2.1 Processos erosivos subaéreos	37
4.2.2 Processos erosivos marinhos	38
4.3 Falésias da Formação Barreiras	42
4.3.1 Falésias do "Pós-Barreiras"	44
4.4 Vulnerabilidade	45
CAPÍTULO IV - RESULTADOS	48
5.1 MAPEAMENTO LIDAR NAS FALÉSIAS COSTEIRAS DO LESTE CEARENSE (NORDESTE DO BRASIL)	48
5.1 Introdução e hipótese	48
5.2 Metodologia	51
5.2.1 Aquisição dos Dados	51
5.2.2 LiDAR	52
5.2.3 Ortofotos	53
5.2.4 Mapeamento	53
5.3 Resultados	54
5.3.1 Falésias Ativas	55
5.3.2 Paleofalésias	58

5.3.3 <i>Voçorocas</i>	60
5.4 Discussões	62
5.5 Conclusões	68
6.2. LITOESTRATIGRAFIA E EVOLUÇÃO DAS FALÉSIAS NO NORDESTE BRASILEIRO.....	70
6.1 Introdução	71
6.1.1 <i>Caracterização da área de estudo</i>	72
6.2 Materiais e métodos	75
6.2.1 <i>Etapa em campo</i>	75
6.2.2 <i>Etapa em Laboratório</i>	78
6.3 Resultados	83
6.3.1 <i>Sedimentologia</i>	84
6.3.2 <i>Geoquímica</i>	87
6.3.3 <i>Cronologia e evolução</i>	91
6.3.4 <i>Estratigrafia</i>	92
6.4 Discussões	96
6.4.1 <i>Deposição e transporte sedimentar das falésias</i>	96
6.4.2 <i>Origem dos sedimentos das falésias</i>	100
6.4.3 <i>Cronologia e evolução das falésias</i>	102
6.5 Conclusões	108
7.3 COASTAL SOFT CLIFF EROSION VULNERABILITY ON EQUATORIAL ATLANTIC (NORTHEAST BRAZIL).....	111
7.1 Introduction	111
7.1 Study area	113
7.2 Methodology	116
7.2.1 <i>Deriving structural and process variables</i>	118
7.3.1 <i>Method validation</i>	123
7.3 Results	123
7.3.1 <i>Morphological settings</i>	123
7.3.2 <i>Coastal Sensitivity Index (CSI)</i>	125
7.4 Discussion	129
7.5 Conclusion	134
CAPÍTULO V - RECOMENDAÇÕES	135
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES GERAIS	136
REFERÊNCIAS	138

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, ANTECEDENTES E JUSTIFICATIVA.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A zona costeira é composta por morfologias variadas, e as falésias que são feições geomorfológicas escarpadas (SUNAMURA, 1992) e ocorrem em 52% da costa mundial (YOUNG e CARILLI, 2019). Desse valor, elas se distribuem da seguinte forma: 47% na costa europeia (SALMAN et al., 2004), 41% na costa Norte Americana (HAMMAR-KLOSE e THIELER, 2001), 40% na costa da Austrália (SHORT e WOODROFFE, 2009), 35% no Ártico (LANTUIT et al, 2012) e 60% na costa japonesa (SUNAMURA et al., 2014). Sua composição é associada a rochas sedimentares, ígneas e metamórficas (BIRD, 2008) e gelo.

As falésias estão classificadas em dois grupos de acordo com a influência marinha atuante em sua base, são elas: a) Falésias ativas ou falésias costeiras (EARLIE et al. 2015; GALILI e ZVIELY, 2018), e b) falésias inativas ou paleofalésias. As ativas formam escarpas erodidas pela ação marinha na base (LEITE et al, 2016) além da interação com outros agentes marinhos e subaéreos (MOORE et al, 2010; MARRERO et al, 2018). Se esse processo estiver encerrado, a falésias é denominada de inativa. A evidência de um precipício ou escarpa inativa com uma linha de costa emergente em frente a ela parece ser uma evidência conclusiva de um penhasco "fóssil" ou "morto" (GUILCHER, 1958).

Neste trabalho é feita a distinção entre (1) falésias inativas e (2) paleofalésias seguindo a denominação feita por Miccadei et al (2019). As falésias inativas (1) são caracterizadas por uma escarpa vertical variando de 15 m a 25 m de altura, com declives convexos-côncavos na parte inferior, possuindo uma barreira que restringe temporariamente os efeitos da erosão marinha, como depósitos de rocha na base ou barreiras antrópicas. As paleofalésias (2) estão entre 15 e 50 m de altura, principalmente com perfis convexos-côncavos, descritas como falésias que possuem uma distância de centenas de metros para a linha de costa atual, restringindo permanentemente os efeitos da erosão marinha.

Com isso, será utilizado o termo paleofalésias para denominar as falésias que não possuem erosão marinha atuante em sua base, e podem se formar no interior do continente (DOMÈNECH et al, 2018), por depressões (FINZI e HARLEV, 2016) ou por flutuação do nível do mar (BAL, 1997; EALEY e JAMES, 2001).

Além disso, vale ressaltar a diferença entre os termos base, topo, escarpa e falésia que serão utilizados neste trabalho. Base é a porção inferior das falésias, onde assenta e suporta o peso das camadas superiores. Topo é a parte superior das falésias, ligeiramente plano com poucos graus de declividade, antes que ocorra a ruptura do relevo. A escarpa é um declive muito íngreme de terreno, provocado por erosão nas bordas de planaltos, serras etc., que está entre a quebra do relevo no topo e a base das falésias. E por último, falésias são feições geomorfológicas compostas por uma escarpa íngreme, à beira-mar, por efeito da erosão marinha.

Quatro processos e fatores interagem para produzir o recuo das falésias segundo Griggs e Runyan (2003): duas delas são de grande escala e fornecem a estrutura regional para a evolução costeira, às mudanças do nível do mar e atividade tectônica. Os outros dois, as propriedades inerentes das falésias (força da rocha, fraquezas estruturais, presença de águas subterrâneas, por exemplo) e as forças externas (energia das ondas, altura das marés, grau de proteção oferecido pela praia, clima e frequência e magnitude dos eventos de tempestades severas) são os fatores locais mais influentes.

Processos superficiais como espraio das ondas, erodibilidade das chuvas e escoamentos superficiais resultam em constantes transformações morfológicas e processos de movimentos de massas, a exemplo dos solapamentos, desmoronamentos e quedas de rochas (DICKSON e PERRY, 2016; GILHAM et al, 2019). São esses processos que tornam áreas pontuais das falésias como uma área de riscos a acidentes quando envolve uma relevante circulação de transientes e turistas.

Acidentes envolvendo desmoronamentos em falésias aconteceram (i) no lago de Furnas, em Capitólio - MG Brasil, que deixou dez mortos em janeiro de 2022 (GLOBO, 2022), enquanto que acidentes envolvendo falésias costeiras aconteceram (ii) na praia de Pipa, nordeste do Brasil, em novembro de 2020 vitimou uma família de três pessoas, entre eles um bebê de apenas 7 meses (GLOBO, 2020); (iii) um trecho de uma costa de Dorset - Inglaterra em julho de 2012 após um deslizamento de terra que matou uma jovem (BBC, 2012); (iv) na praia Maria Luísa - Portugal, onde cinco pessoas morreram e três ficaram feridas em agosto de 2009 (PÚBLICO, 2009), e (iv) em Gracetown, na Austrália Ocidental, em 1996, onde foram mortos quatro adultos e cinco crianças, as vítimas estavam abrigadas sob uma saliência de rocha na base do penhasco de calcário durante uma tempestade quando o penhasco desabou sem aviso (GORDON, 1999).

O processo de colapso da falésia aparece como um sistema natural complexo, devido à grande quantidade de parâmetros capazes de levar a um desmoronamento. Além

da geomorfologia do perfil das falésias retirando sedimentos da base e causando uma pressão das camadas subjacentes (EPIFÂNIO et al., 2013; KHATTABI et al., 2018; DI LUCCIO et al., 2022), a hidráulica, a permeabilidade, a porosidade do material (DUPERRET et al., 2009) e a energia da onda também devem ser levados em consideração (MARQUES, 2018).

No Brasil, as falésias ocorrem ao longo do litoral e se estendem desde a região Amazônica, por toda região costeira Norte e Nordeste, até o Sudeste do país no estado do Rio de Janeiro (NUNES et al. 2011). Essas feições estão associadas predominantemente às rochas da Formação Barreiras de idade Pleistocênica (SAADI e TORQUATO, 1992). No estado do Ceará as falésias estão predominantemente localizadas no litoral Leste, associadas aos depósitos sedimentares da Bacia Potiguar, e se estendem na direção oriental pelo litoral do Rio Grande do Norte (até o município de Touros).

Devido à expansão urbana e turística da zona costeira no litoral leste do Ceará (SIQUEIRA et al., 2017), e crescimento do geoturismo, que utiliza feições geológicas como atrativos principais (PINTO et al., 2018), o trabalho visa preencher lacunas referente às características geológicas e sedimentológicas das falésias, e com isso mapear os pontos que apresentam maiores vulnerabilidades a eventos de alta energia atualmente e fazer previsões para o futuro.

Estudos em falésias costeiras são feitos por pesquisadores de várias partes do mundo, com enfoques maiores no cálculo da taxa de erosão (GALILI e ZVIELY, 2018; PRÉMAILLON et al., 2018; YOUNG, 2018; TEREFEENKO et al., 2019; LÓPEZ et al., 2020). Por isso, além de apresentar as taxas de erosão, este trabalho visa identificar a localização com um mapeamento baseado em técnicas de LiDAR de todas as falésias do litoral leste do Ceará, sua composição sedimentológica e seus pontos de vulnerabilidade identificando *hotspots* erosivos nas condições atuais e cenários futuros; validando com resultados de taxa de erosão e identificando os pontos mais vulneráveis das falésias, auxiliando na gestão costeira e planejamento ambiental da região.

Para isso, são apresentadas a composição sedimentar, química e estratigráfica das falésias, além das idades com a técnica de Luminescência Opticamente Estimulada (LOE), pois é o mais adequado para esse tipo de depósito sedimentar recente e afossilíferos (TATUMI et al., 2008; GANDINI et al., 2014; SOUZA et al., 2016a).

O estudo desses depósitos é de grande relevância para a reconstituição dos eventos de oscilação do nível do mar e da evolução climática e tectônica da costa brasileira no

final do Quaternário. Assim, entender como as mudanças climáticas poderão afetar as falésias arenosas.

Pesquisas relacionadas especificamente à vulnerabilidade de falésias arenosas são recentes e escassas devido ao aumento da ocupação e urbanização do litoral com esta composição, com estudos encontrados no Reino Unido (BARKWITH et al., 2014a; BARKWITH et al., 2014b). No Brasil, os trabalhos sobre a questão da vulnerabilidade abordam a zona costeira como um todo (MUEHE, 2010; NICOLODI e PETERMANN, 2010) e não sobre a vulnerabilidade em falésias em pontos específicos.

A estrutura da tese é composta de objetivos, caracterização da área de estudo (Clima, oceanografia, geologia e geomorfologia), referencial teórico sobre falésias, morfologia, processos erosivos marinhos e subaéreos, Formação Barreiras, "Pós-Barreiras" e vulnerabilidade.

Para apresentar os resultados do estudo, a tese foi dividida em 3 partes e cada uma possui formatos de artigos científicos, e cada capítulo possui sua hipótese. Como a tese está apresentada em formatos de capítulos, cada um deles possui sua hipótese, metodologia, resultados e discussões.

A 1ª parte aborda o mapeamento LiDAR nas falésias costeiras do litoral cearense (nordeste do Brasil) que foi publicado na revista *Geociências da UNESP*, volume 39 (2) em julho de 2020. A 2ª aborda a litoestratigrafia e evolução do pacote sedimentar das falésias no litoral leste do Ceará, que está em fase de finalização para publicação. Por último, e a 3ª será sobre a vulnerabilidade das falésias que está escrito em inglês pois foi o produto da bolsa CAPES PRINT de doutorado sanduíche na Universidade Politécnica da Catalunha, com supervisão do Prof. Dr. Jose Jimenez. Este último capítulo será publicado na revista *Ocean & Coastal Management*.

Todos os resultados que estarão disponíveis gratuitamente para consulta pública, serão fundamentais para a tomada de decisão da gestão costeira local, evitar acidentes graves e para estudantes e comunidade científica seguir e aprofundar os estudos no tema. Pois, as mudanças climáticas estão acelerando os processos de erosão de falésias e notícias de desmoronamento de falésias próximas a áreas urbanas estão se tornando mais recorrentes (G1, 2021-a; G1, 2022; SWIRAD e YOUNG, 2022).

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Auxiliar na gestão costeira em praias que possuem falésias arenosas de acordo com a caracterização, influência marinha, litoestratigrafia, evolução e vulnerabilidade.

2.2 Objetivos Específicos

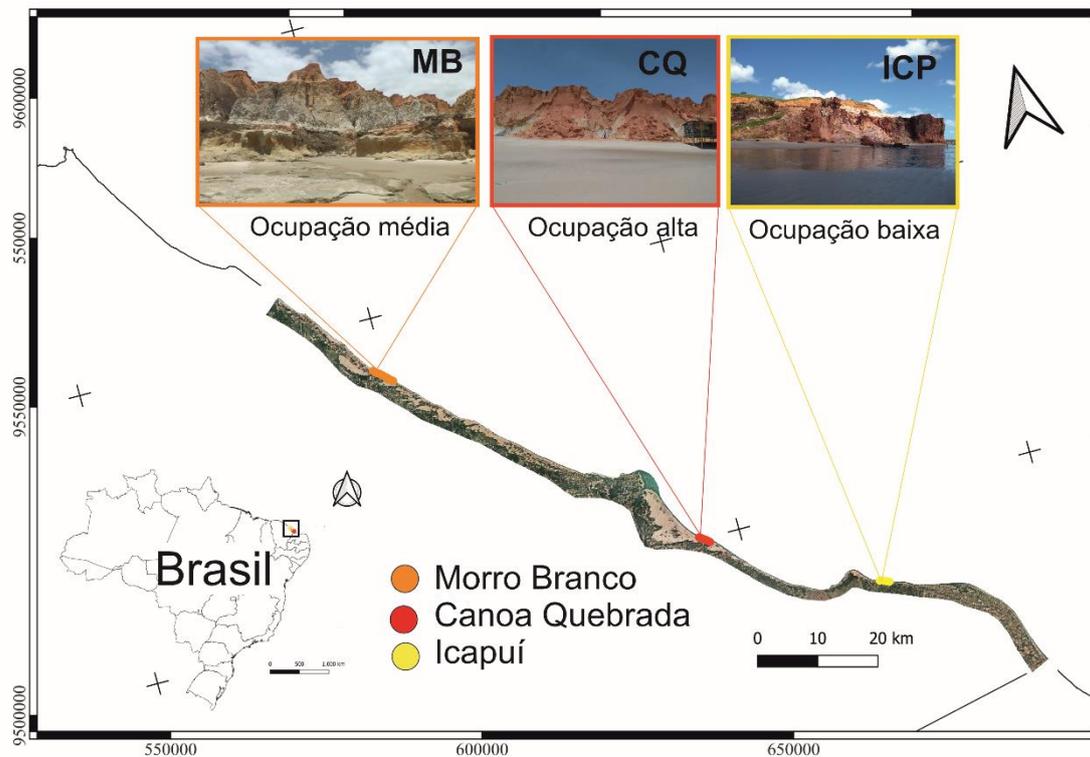
1. Mapear as falésias ativas, inativas e paleofalésias na costa leste do Ceará, identificando a real posição destas na costa e possíveis pontos de risco a desmoronamentos.
2. Analisar a litoestratigrafia e evolução do pacote sedimentar das falésias ativas nas praias de Morro Branco (Beberibe), Canoa Quebrada (Aracati) e Peroba (Icapuí), para diferenciar e ranquear a erodibilidade das falésias.
3. Mapear a vulnerabilidade das falésias arenosas ativas do litoral leste do Ceará à erosão costeira, identificando os pontos de maiores riscos aos desmoronamentos.

CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no litoral leste do Ceará, Nordeste do Brasil, nas coordenadas 4° 09'08.98 Leste, 38° 06'42.2 Sul, e segue às coordenadas 4° 39'19.32 leste e 37° 27'18.0 sul. A costa do Estado do Ceará tem 573 km (IPECE, 2013), destes 184.21 km estão situados no litoral Leste, representando 32.14% da costa do Estado (Fig.1).

A zona costeira é morfologicamente diversa, incluindo ambientes de estuário, falésias, campos de dunas, praias arenosas e lagoas costeiras. Com isso, o estudo é focado em três praias principais: Morro Branco (Beberibe), Canoa Quebrada (Aracati) e Peroba (Icapuí). Para melhorar a caracterização da área separamos em tópicos: meteoclimatológicos, geológicos e geomorfológicos, antrópicos e de proteção ambiental.

Figura 1 - Mapa de localização da zona costeira analisada no trabalho, destacando as 3 principais praias com falésias arenosas no litoral leste do Ceará (Nordeste do Brasil), indicando seu nível de ocupação: Baixa (Icapuí), média (Morro Branco) e alta (Canoa Quebrada).

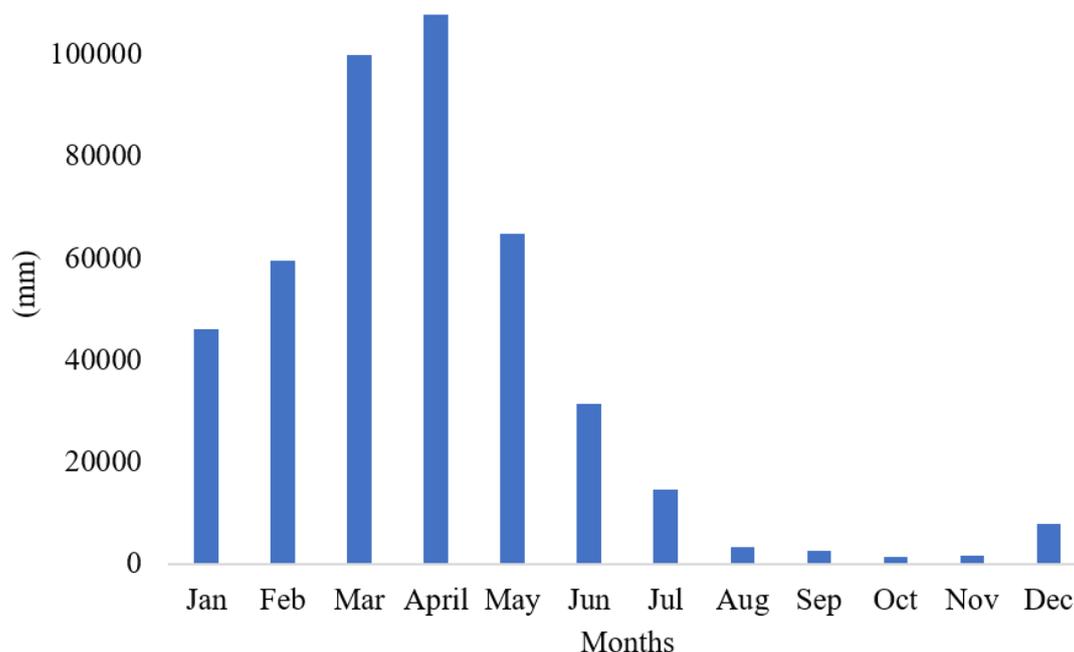


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Meteoceanográficos

O clima é predominantemente do tipo Tropical Semiárido Brando marcado por dois períodos definidos - um seco, longo e outro úmido, curto e irregular, (CAMPOS e STUDART, 2003) causado pela migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A distribuição temporal das precipitações é irregular com concentração do total precipitado no primeiro semestre do ano (Figura 2). Cerca de 60% do total anual precipita-se em apenas três meses (fevereiro/março/abril ou março/abril/maio), com decréscimo acentuado de Fortaleza (1338 mm) em direção a Icapuí (949.2 mm) (CAMPOS e STUDART, 2003).

Figura 2 - Gráfico da média histórica de distribuição da precipitação em um ano na praia de Canoa Quebrada, Aracati. Sinalizando os meses de março e abril mais chuvoso é entre agosto e novembro com pouco ou quase nenhum registro de precipitação.



Fonte: Autor baseado nos dados da FUNCEME.

Os ventos exercem um papel fundamental no litoral do Nordeste brasileiro haja vista a acumulação de dunas e praias arenosas ao longo da costa do Ceará (MORAIS et al., 2006). Nos meses de março e abril, ápices do período chuvosos, predominam ventos de SE (120° - 150°) ao longo do dia, passando a SSE-S (150° - 180°) durante a noite, com velocidade média variando de 3 a 9 m/s (MAIA, 1998).

O regime de ventos é fortemente sazonal, com baixas velocidades prevalecendo durante a estação chuvosa com velocidade média de 5,47 m/s-1, e velocidades mais elevadas durante a estação seca com velocidade média de 7,75 m/s-1 (MAIA et al., 2000). A direção do vento não segue um padrão sazonal específico, apresentando padrões variáveis durante os períodos de março e abril (SE/ 120° - 150° a SSE-S/ 150° - 180°), maio a agosto (ENE-E/ 60° - 90° a E-SE 90° - 150°) e setembro a dezembro com ventos predominantes de E-SE (MORAIS et al., 2006).

Guerra (2014) destaca que as maiores taxas de velocidade de vento no litoral cearense são registradas nos meses de setembro a novembro, onde consequentemente, o transporte eólico de sedimento praia-continente/continente-praia também é intensificado.

O estudo das variantes oceanográficas, como as ondas, está diretamente associado ao conhecimento das condições eólicas da zona costeira é de fundamental importância,

uma vez que a força motriz por trás de quase todo processo costeiro é devido às ondas e ao vento (MORAIS, 1996). A atuação dessa variável atmosférica sobre a superfície do mar determina as características da onda (altura, período, comprimento etc.), considerando os aspectos como a magnitude, duração e a distância de atuação dos ventos.

As ondas no litoral leste do Ceará apresentam uma componente de E com direções variando entre os quadrantes E, E-NE e E-SE mantendo uma estreita relação com as direções predominantes dos ventos. No primeiro semestre do ano, a frequência de ondas *swell* é maior, devido à diminuição da influência dos alísios de SE e o aumento da turbulência no Atlântico Norte (MORAIS et al., 2006).

As alturas significativas das ondas variam predominantemente (75%) entre 1.1 e 1.6m nos meses de agosto a dezembro, chegando a uma máxima de 2.3m em outubro (SILVA et al, 2011). Em Aracati, litoral leste do Ceará, a altura de onda (Hs) frequente é entre 1.3 e 1.73m (MAIA, et al., 2005). Na costa dos estados do Nordeste até o Maranhão, o regime predominante é de mesomaré (altura de maré entre 2m e 4m). alturas de maré acima de 4m são definidas como macromarés, e são encontradas no litoral dos estados do Norte do país (TESSLER e GOYA, 2005).

De acordo com os dados entre os anos de 2017 e 2020 obtidos no Surf guru através do modelo *Wavewatch III*, a média da altura de onda *offshore* no leste do Ceará é de 1.61 metros, o período de 8.6 segundos e potência de 11.8 quilowatts. Em geral, as ondas maiores são as mais potentes, mas a potência da onda também é determinada pela velocidade da onda, o comprimento de onda e a densidade da água.

A maré é uma forçante oceanográfica que interfere tanto na morfodinâmica quanto na hidrodinâmica costeira, principalmente na ampliação da área de alcance das ondas e na formação de correntes próximas à costa. As marés no litoral leste se enquadram no regime de mesomarés (altura entre 2 e 4 metros) sendo do tipo semi-diurna com período de 12,4 h e defasagem média de 50 minutos. Maia (1998) constatou uma altura máxima da maré de até 3,23 m, e mínima de 0,75 m, além disso, observou que durante os meses de junho a dezembro há tendência crescente na altura das marés de quadratura e sizígia, com padrão inverso nos meses de setembro e março.

Eventos de alta energia, como ressaca seguidos de *overwash* ocorrem sazonalmente nos 573 km do litoral cearense como consequência da sobrelevação dos níveis d'água do mar, pesquisadores destacam as consequências desses eventos de alta energia, principalmente os ocasionados pela coincidência das maiores alturas das marés

(~3,2 m) associadas a maior frequência das ondas *swell* com períodos superiores a 10s (PAULA et al, 2011; GUERRA, 2014).

Segundo Maia e Pinheiro (2016), os eventos de alta energia podem vir de duas maneiras: (1) através de ciclones e tempestades tropicais e extratropicais do Hemisfério Norte e chegam ao Nordeste brasileiro na forma de *swell* e, portanto, associados à ocorrência de ressacas; (2) em associação com ventos locais (*nonstorms*), como é o caso do litoral do Ceará. No segundo semestre, precisamente de agosto a outubro, ventos alísios de SE são capazes de transferir energia para as ondas e, se formadas durante as marés de sizígia, provocam o empilhamento das águas próximo à costa que, dependendo da topografia da praia, o espraçamento máximo (*runup*) pode alcançar a crista da duna frontal ou alguma estrutura urbana resultando em possíveis galgamentos e/ou inundações.

Cotrim et al, (2022) afirma que as ondas de *swell* são mais altas, mais enérgicas e mais prevalentes no mar aberto do que as ondas do mar. Morais et al, (2019) alertam que para os próximos 100 anos, havendo aumento do nível do mar, como previsto, haverá aumento no volume de água dos estuários associado ao déficit sedimentar e consequente ocorrência de inundações causada pela fragilidade do ambiente costeiro.

3.2 Geológicas e Geomorfológicas

Na costa do Ceará, os Tabuleiros pré-litorâneos são constituídos predominantemente por sedimentos Tércio-Quaternários da Formação Barreiras (MORAIS et al, 2018), por depósitos de origem terrestre (BIGARELLA, 1975) areno argilosos de coloração avermelhada, alaranjada e esbranquiçada, associado ao sistema de deposicional do tipo leque fluvial (CASTELO BRANCO, 2003). A Formação Barreiras é localmente representada por arenito conglomerados mal selecionados e com seixos de quartzitos arredondados a sub-angulosos cimentados por material argiloso (SIQUEIRA et al., 2014). Apresenta diferentes colorações nas escarpas das falésias, com tons avermelhados, alaranjados, amarelados, acinzentados e pretos.

As paleofalésias foram esculpidas na Formação Barreiras, e as falésias ativas, no litoral de Beberibe, são compostas pelas Formações Barreiras no topo e Tibau na base, com afloramentos de plataformas de abrasão na antepraia (MORAIS et al, 2018). No ponto de encontro entre as duas formações nas praias de Morro Branco e Praia das Fontes (Município de Beberibe) há a presença de fontes d'água na escarpa (GONÇALVES JÚNIOR, et al., 2009).

De acordo com Pinheiro (2003), devido à sua porosidade, as falésias do tipo semiconsolidadas podem armazenar temporariamente água da chuva ou de escoamento superficial. E posteriormente, abrir fissuras em sua escarpa formando exultórios e bicas na parte mais íngreme de sua morfologia, como por exemplo ocorrem nas falésias da praia de Morro Branco e praia das Fontes em Beberibe. Além disso, essas fissuras podem apresentar pontos erosivos subaéreos posteriores, que são acelerados pela ocupação urbana e impermeabilização do solo.

Na praia de Morro Branco esse pacote surge recobrimdo a Formação Tibau e apresenta três colorações distintas do topo para a base (laranja, branco e vermelho). A composição da Formação Tibau é um arenito esverdeado, contendo bolas de argila e estruturas de bioturbação depositados por sistema fluvial que aflora nos municípios de Beberibe e Fortim (CASTELO BRANCO, 2003).

Na praia de Pontal do Maceió, as falésias possuem caráter arenoso fortemente cimentado a Oeste do pontal, compostas pelo Formação Barreiras e falésias de grau de cimentação alto no pontal compostas por arenitos da Formação Tibau (LEITE et al., 2016).

A planície costeira de Icapuí é constituída por um complexo conjunto de unidades morfológicas, decorrentes das mudanças do nível relativo do mar e flutuações climáticas durante o Quaternário (MEIRELES e SANTOS, 2011). Apresenta dados que corroboram com a neotectônica na escarpa das falésias, com falhas e dobramentos (SOUSA et al., 2008b), com litologia aflorante composta pelos conjuntos: (i) unidade de rochas carbonáticas, correlacionada à Formação Jandaíra, que ocorre de forma restrita como plataforma de abrasão nas falésias com idade estimada entre 80 a 90 milhões de anos; (ii) unidades de rochas siliciclásticas, correlacionadas às formações Barreiras e Tibau, que predominam lateral e verticalmente ao longo das falésias; (iii) rochas da Formação Potengi, no topo das falésias (SOUSA et al, 2008).

A área das falésias arenosas expõe um aspecto de morfologia ruiniforme ocasionado pela pluviometria e por enxurradas, ao que se acrescenta a ocorrência de ravinas e voçorocas (MORAIS et al, 2006).

Meireles e Santos (2011) descreve a evolução geomorfológica da planície do Icapuí, onde

“A dinâmica evolutiva proposta para a planície costeira de Icapuí foi caracterizada pela identificação e análise dos indicadores paleogeográficos e paleoclimáticos (reconstrução dos antigos níveis marinhos), registrados

fundamentalmente em dois conjuntos de terraços marinhos associados ao estuário Barra Grande e, na plataforma continental interna, ao delta de maré.

O contato erosivo entre um depósito sedimentar pleistocênico com características estruturais e mineralógicas tipicamente continentais (Formação Barreiras), com depósitos sedimentares mistos (estuarino e lagunar) e marinho/costeiro (praia e delta de maré) demarca o limite continental da planície costeira. Esse contato foi delimitado morfológicamente por uma linha de falésia morta (paleofalésias, falésia fóssil) com aproximadamente 30 km de extensão, escarpas com altitude média de 15 metros e sentido sudeste-noroeste (Figura 2). As paleofalésias evidenciam o limite do nível do mar durante a penúltima transgressão (SUGUIO et al, 1985) de onde, com o início do evento regressivo subsequente, é iniciada a composição das formas litorâneas atualmente dispostas na planície costeira. Como evidência morfológica restaram antigos níveis de praia dispostos nas proximidades das paleofalésias, denominados de terraço marinho pleistocênico.”

3.3. Antrópicos

As falésias são importantes para a exportação de sedimentos que alimentam o ambiente praiado, na proteção da linha de costa, na manutenção de aquíferos subterrâneos, na fixação de vegetação, a exemplo das restingas, além de terem valores paisagísticos atrativos.

Tais características as tornam alvos para a ocupação em trechos irregulares (Câmara e Silva, 2021), especulação imobiliária, pisoteamento, estabelecimento de infraestruturas que favorecem e concentram os processos de escoamento superficial sobre as falésias. Além das atividades turísticas massivas, exploratórias e desestruturadas, que é responsável, por exemplo, pela compactação do solo e alargamento de ravinas e voçorocas já existentes sobre as falésias (Silva et al, 2020). Tudo isso em virtude da proximidade com o mar, da disponibilidade em abundância dos recursos naturais e visões privilegiadas.

Quando isso se concretiza de forma desordenada e em locais legalmente proibidos, tem-se múltiplos impactos; de caráter social, econômico, ambiental, além da descaracterização da cultura local e geração de conflitos (Silva & Farias Filho, 2019; Santos, 2014; Moura, 2009).

Apesar disso, as praias do litoral leste do Ceará, como a de Canoa Quebrada, ainda mantêm parte de suas raízes históricas de uma vila de pescadores. Isso pode ser

visualizado pela presença de embarcações de cunho pesqueiro, construídas por pescadores, que exercem a prática da pesca artesanal na região (Azevedo, 2007).

Assim como a praia de Morro Branco que inclusive possui um Sistema de Controle da Pesca Marinha no litoral do município de Beberibe, para acompanhar/monitorar a atividade pesqueira local, buscando garantir a sustentabilidade das espécies capturadas e, adicionalmente, a implantação (em parceria) de Ações Educativas Ambientais e fiscalização (IBAMA, 2013; Projeto Orla, 2004; Gonzalez et al., 2019). Em Beberibe, de mediana representatividade econômica, a pesca é, individualmente, a atividade mais importante, representada pela pesca artesanal de água salgada, incluindo peixe, lagosta e camarão (PRODETUR, 2014).

E em Icapuí, segundo o Programa de Desenvolvimento do Turismo (PRODETUR, 2014) a principal atividade econômica é a pesca, com destaque para pesca da lagosta onde é palco da “Guerra da Lagoa”, uma série antiga de muitos conflitos envolvendo dois grupos de pescadores: os artesanais, que usam os métodos permitidos pela legislação brasileira e que configuram uma prática sustentável; e os ilegais, que faz uso de instrumentos que prejudicam a reprodução das espécies (OLIVEIRA et al, 2016). Em suas praias, ainda é possível avistar o peixe-boi-marinho, mamífero ameaçado de extinção e, principalmente, fazer contato e troca de experiência com comunidades de pescadores tradicionais (PRODETUR, 2014).

3.3.1 População

A população da macrorregião do litoral leste do Ceará, segundo o IBGE (2010) era constituída de 200.126 habitantes. Correspondia a uma parcela de 2,26% da população do Estado que era de 8.842.791 habitantes naquele mesmo ano. A população urbana era de 109.369 habitantes e a população rural correspondia a 90.757 habitantes. A taxa de urbanização era de 54,65%, dentre o ordenamento decrescente das 14 Macrorregiões de Planejamento do Estado.

O Litoral Leste tinha uma área de 4.631,2 km² e uma densidade demográfica de 43,21 habitantes por km². Sua área correspondia a 3,11% da área do Estado, com 148.825,6 km². O Litoral Leste ocupava a penúltima menor área dentre as 14 macrorregiões do Estado.

Segundo estimativas do IBGE (2010) de acordo com o censo feito em 2010, a população de Beberibe em 2010 de 49.334 habitantes, saltando para 53.110 em 2017; em

Aracati a população era de 69.167 em 2010 saltando para 73.629 em 2017; e Icapuí a população era de 18.393 em 2010 e saltou para 19.685 em 2017.

O processo de urbanização no Litoral Leste se apresenta mais concentrado nos municípios de Aracati e Fortim (refletindo o seu desmembramento recente de Aracati, em 1992). A taxa média de urbanização dos municípios do Litoral Leste coloca a região na nona colocação dentre as 14 Regiões de Planejamento do Estado, com um coeficiente de 54,63%.

Sabendo os dados de população, vemos que o número de habitantes ano é o problema em relação às características ambientais e sim onde essas pessoas estão e principalmente o turismo que essa região proporciona.

3.3.2. Turismo

De acordo com a Secretaria de Turismo do Estado do Ceará (2016), o litoral cearense foi reordenado em atividades turísticas, inserido na lógica da ocupação moderna, sobretudo por incentivos do poder público na tentativa de desafogar a concentração turística na capital, priorizando a interiorização do turismo. Aracati e Beberibe, juntos, representam aproximadamente 24,46% dos destinos turísticos, enquanto o município de Icapuí detêm 1,56% (SETUR/CE, 2016).

A oferta hoteleira nos municípios praianos da Costa Leste segundo os levantamentos da Secretaria de Turismo do Ceará realizados em dezembro de 2016 se mostra Aracati com o maior número de hotéis (88) seguido por Beberibe (37) e Icapuí (28), porém Beberibe possui o maior número de habitações (1.580) e leitos (4.764) (SETUR, 2016).

A demanda turística nos principais municípios da Costa Leste responsáveis por deter atratividade turística mais expressiva, apresenta a seguinte evolução entre os anos de 2010 e 2016 (tabela 1). A demanda turística também pode ser expressa pelo número de turistas por dia, isto é, pela soma de turistas multiplicada pelo total de dias que, em média, ficam naquele destino. Essa expressão pode ser mais adequada porque permite perceber que muitas vezes uma quantidade menor de turistas pode revelar uma demanda maior, se considerado o tempo médio de estadia deles. Permite também referenciar melhor as estimativas de gastos dos turistas em cada localidade.

Dessa forma, a tabela 2 a seguir evidencia uma evolução da demanda turística de 2,58 milhões de turistas por dia em 2010 e de 3,37 milhões de turistas por dia em 2016 no litoral leste do Ceará.

Tabela 1 Demanda turística nos principais municípios do litoral leste do Ceará.

ANO	BEBERIBE		ARACATI		ICAPUÍ	
	Nº TURISTAS	Nº DIAS (*)	Nº TURISTAS	Nº DIAS (*)	Nº TURISTAS	Nº DIAS (*)
2010	243.256	4,8	240.202	5,4	12.553	9,4
2011	280.158	7,5	275.401	5,0	13.879	8,7
2012	317.475	8,0	294.545	5,4	15.842	9,2
2013	233.876	5,2	300.679	6,5	34.188	6,3
2014	253.140	4,0	314.564	5,1	40.688	6,3
2016	264.349	4,9	346.205	5,1	47.188	6,5

Fonte: SETUR, 2016

Tabela 2 -Evolução da demanda turística no litoral leste referente aos municípios de Beberibe, Aracati e Icapuí.

ANO	DEMANDA TURÍSTICA (*)		
	Nº Turistas	Turistas/Dia	Média de dias
2010	496.011	2.582.718	5,2
2011	569.438	3.598.937	6,3
2012	627.862	4.276.089	6,8
2013	568.743	3.385.953	6,0
2014	608.392	2.873.171	4,7
2016	657.742	3.367.678	5,1

Fonte: SETUR, 2016

Segundo a SETUR (2019) Isso dá uma ideia do teor da população flutuante nessa região e municípios, em contraponto, há demanda de serviços urbanos que em geral, os municípios e os focos de atratividade turística não estão preparados e nem possuem os meios adequados para atender, o que tem exigido o aperfeiçoamento das análises técnica e ambiental nessas localidades, para evitar processos acelerados de degradação e perda de mercado turístico.

Em Aracati, a praia de Canoa Quebrada, internacionalmente conhecida, é uma região bastante procurada por turistas, o que faz com que a atividade turística seja explorada, em alguns momentos, de forma intensiva. antigo reduto hippie, o lugar é hoje dos mais agitados do litoral leste e atrai a atenção de muitos turistas estrangeiros (PRODETUR, 2014).

Beberibe, Aracati e Icapuí entraram nos municípios nordestinos prioritários para o desenvolvimento do turismo, e os potenciais impactos causados pela implementação do Programa de Desenvolvimento do Turismo – PRODETUR/NE no Nordeste brasileiro, concebidas nos anos 1990 e 2000 foi feito por Silva (2022). Os resultados desta pesquisa mostraram algum efeito em renda e trabalho, porém efeito nulo em variáveis como educação, saúde, pobreza e desigualdade, sugerindo que apenas o desenvolvimento do setor não foi capaz de solucionar os problemas socioeconômicos da região, sendo necessária a formulação de políticas distributivas.

O turismo em Icapuí apresenta grande potencial de crescimento, com pequenas pousadas familiares instaladas e alguns poucos empreendimentos hoteleiros de maior porte (PRODETUR, 2014).

3.4 Proteção ambiental.

No Brasil, as falésias foram definidas como Áreas de Preservação Permanente (APPs) devido a sua função ambiental de preservação dos recursos hídricos, da paisagem, da estabilidade geológica, além de proteção ao solo e assegurar o bem-estar das populações humanas, desde suas rupturas até 100 metros em direção ao continente (Conama, 2003; Brasil 2012).

Ainda, são constantemente alvos de proteção adicional fornecidas por Unidades de Conservação (UCs), na tentativa primordial de disciplinar o uso e ocupação do solo nessas regiões dinâmicas e controlar a exploração desenfreada dos sedimentos.

Foi por esse motivo que ainda no século passado, em 1998, foi criada a Área de Proteção Ambiental (APA) de Canoa Quebrada, que é tipo de UC que tem o objetivo geral de disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais (BRASIL, 2000), enfatizando a proteção das falésias com vistas à manutenção do equilíbrio ecológico (SEMACE, 2010; ARACATI, 1998).

Além dela, existe outra área de proteção ambiental: Área de Relevante Interesse Ecológico - ARIE Estevão (ARACATI, 1998). Mesmo sendo uma Unidade de Conservação com principal objetivo de manter os ecossistemas naturais de importância regional ou local e regular o uso admissível dessas áreas, de modo a compatibilizá-lo com os objetivos de conservação da natureza, Silva (2022) verificou alguns impactos adversos, como a chegada da droga, o tráfego desordenado de veículos, ausência do poder público

em atividades como planejamento turístico, bem como oferta de recursos profissionalizantes para os nativos da ARIE.

Atualmente, as falésias do município de Beberibe estão inseridas em uma Unidade de Conservação denominada Monumento Natural das Falésias de Beberibe com uma área de 31.29 hectares e protegida pelo Decreto nº 27.461 de 04/06/2004 (SEMACE, 2010a). Essa unidade é de conservação com proteção integral e uso restrito a visitação e contemplação paisagística. 15 anos após sua criação, segundo a Portaria Nº 171/2019 e no decreto Nº 32.962 de 13 de fevereiro de 2019 resolve aprovar o plano de manejo da Unidade de Conservação (CEARÁ, 2019).

Por último temos a Área de Proteção Ambiental da Praia de Ponta Grossa (Icapuí), que está próxima a área de estudo, porém por estar dentro da categoria de uso sustentável, a efetiva proteção contra impactos ambientais é branda (ICAPUÍ, 1998). Esta possui o objetivo de (i) proteger as comunidades bióticas nativas, as nascentes dos rios, as vertentes e os solos; (ii) proporcionar a população regional métodos e técnicas apropriadas para o uso do solo, e (iii) desenvolver na população uma consciência ecológica e conservacionista. Assim, no Art 3º deixa claro a proibição ou restrição de qualquer tipo de atividade, construção ou empreendimento em dunas móveis, dunas com vegetação fixadora, falésias e manguezais ficam terminantemente proibidas.

Por isso, de acordo com Câmara e Silva (2021, p.1044) em um estudo de ocupações irregulares em topo de falésias conclui que,

A influência de UCs, sobretudo as do tipo integral, dificultam a expansão da ocupação irregular em APPs de falésias, bem como a presença e aplicação de documentos normativos que regem sobre a ocupação, como o Plano de Manejo e o Projeto Orla.

Ademais, propõe-se a criação de uma unidade de conservação que engloba as falésias da praia de Redonda em Icapuí, a fim de contribuir na organização espacial da ocupação e impedir futuras construções e loteamentos em áreas irregulares e que não estejam em acordo com a legislação ambiental vigente, bem como, gerir as atividades turísticas presentes, em consonância com estilo de vida da população local.

Aconselha-se, ainda, estudos para viabilizar a implantação de uma UC do tipo integral em Canoa Quebrada, na região leste da APA Canoa Quebrada, onde a ocupação ainda não é consolidada, a fim de evitar a expansão da malha urbana e a supressão e destruição de falésias, dunas e vegetação nativa, assim como foi instituído o MONA das Falésias de Beberibe.

Acrescenta-se, ainda, a necessidade da elaboração do Plano de Manejo da APA de Canoa Quebrada, sendo este um instrumento importante na regulação das atividades nos limites da UC referida, adequando-a ao SNUC.

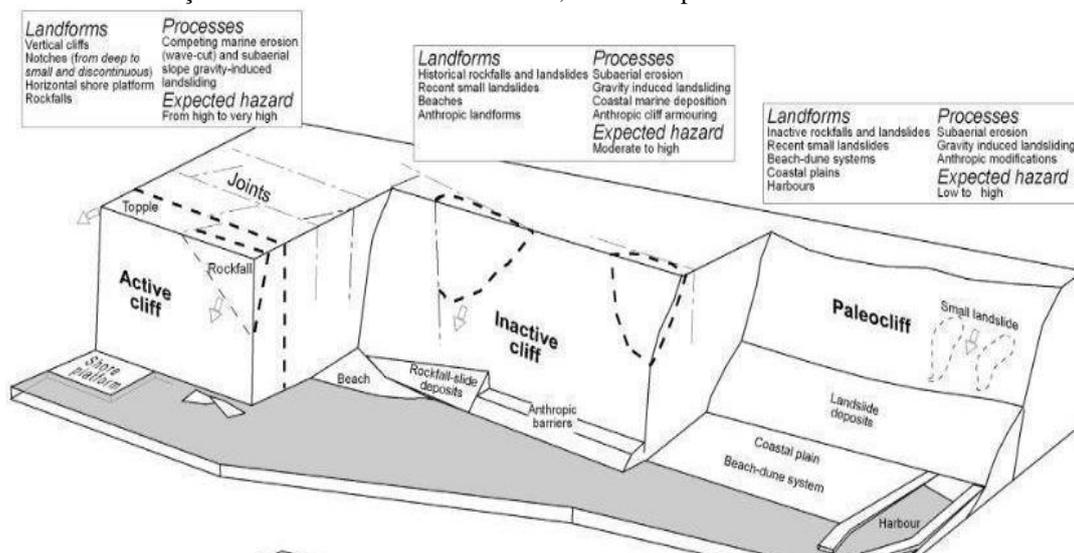
CAPÍTULO III - REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Falésias

São feições geomorfológicas compostas de fácies abruptas formados pela ação erosiva (abrasão) das ondas sobre as rochas (SUGUIO,1998). Miccadei et al, (2019) classifica as falésias costeiras em três grupos: ativas, inativas e paleofalésias (Fig. 3). As falésias ativas estão sendo modeladas constantemente por ações das ondas e marés, sua escarpa apresenta feições como solapamentos e desmoronamentos, e dependendo da litologia apresenta risco em sua base. As falésias inativas são aquelas que está próxima a zona costeira (poucos metros) e possuem um obstáculo em sua base, podendo ser uma obra de proteção costeira, construções antropogênicas ou mesmo a queda de blocos rochosos do perfil superior das falésias que impede a ação das ondas em sua base.

Por último, as paleofalésias são aquelas que estão mais distantes da linha de costa (dezenas, centenas ou milhares de metros), no qual a influência marinha em sua base não ocorre a séculos ou milênios (MICCADEI et al., 2019). Essa longa distância pode estar associada a variações de nível do mar e neotectônica da região. Devido a ação subaérea ser maior que a ação marinha, o perfil das paleofalésias são suavizados e a vegetação é mais desenvolvida.

Figura 3 - Classificação das falésias costeiras em ativas, inativas e paleofalésias.



Fonte: Miccadei et al (2019).

A classificação das falésias de acordo com Bird (2008) leva em consideração a declividade de sua escarpa em dois tipos: as *Cliffs* e as *Bluffs*. As falésias que possuem escarpas até 40° de inclinação são chamadas de *bluffs* e escarpas com inclinação superior a 40° são chamadas de *cliffs*. Essa declividade caracteriza também as falésias ativas e as paleofalésias. Com isso, as *Cliffs* são caracterizadas por falésias ativas, devido a maior erosão marinha em sua base, seu perfil tende a ficar mais íngreme. As *bluffs* são associadas às paleofalésias, no qual a erosão subaérea é superior, suavizando o perfil do penhasco.

4.1.1 Morfologia

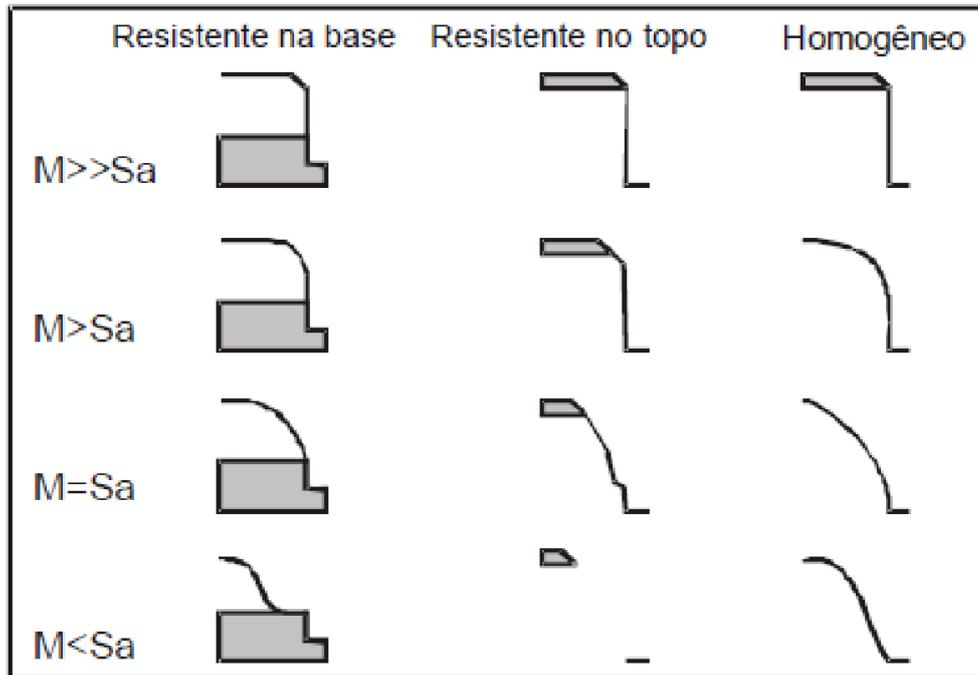
As falésias de 100 a 500 m de altura são chamadas de falésias altas, enquanto aquelas com mais de 500 m são mega falésias, um exemplo em Vidoy nas Ilhas Faerø, com 725 m de altura. As micro-falésias têm geralmente menos de um metro de altura, formadas onde os processos marinhos atacaram as margens dos litorais de baixa altitude (BIRD, 2016).

A classificação morfológica dos perfis das falésias de acordo com Emery e Kuhn (1980), se baseia na erodibilidade da base e do topo, associada com o grau de homogeneidade da litologia das falésias. Considerando as ações marinhas em sua base (ondas e marés), e os processos subaéreos no topo (temperatura, ventos e chuva), a classificação dos autores apresenta perfis que correspondem ao processo dominante associado à heterogeneidade ou não da composição das falésias (Fig. 4).

Quando a erosão marinha prevalece em relação a erosão subaérea o perfil da escarpa tende a ser mais íngreme. Quando as erosões são invertidas, ou seja, a ação subaérea é maior que as marinhas, o perfil tende a suavizar. Exatamente o que ocorre entre as falésias ativas e as paleofalésias.

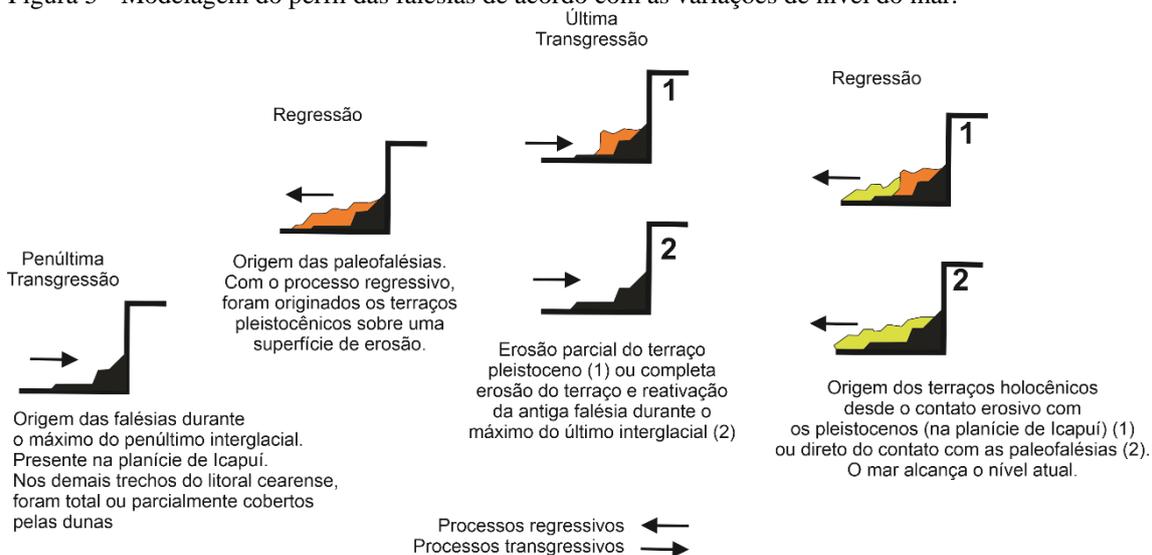
O perfil das falésias não é controlado apenas por ações erosivas marinhas e subaéreas. Outro fator importante que modela os perfis das falésias é a variação do nível do mar, descrita por Meireles (2014) (Fig. 5), no qual detalha desde a origem dos terraços Holocênicos em contato com os Pleistocênicos ou direto em contato com as paleofalésias em período de regressão marinha.

Figura 4 - Perfil das escarpas das falésias de acordo com a erosão marinha (M) e erosão subaérea (Sa).



Fonte: Emery e Kuhn (1980).

Figura 5 - Modelagem do perfil das falésias de acordo com as variações de nível do mar.



Fonte: Meireles (2014).

Segundo o autor *op. cit* na última transgressão ocorreu a erosão parcial ou completa do terraço Pleistocênico e reativação das antigas falésias durante o máximo do último interglacial. Depois houve outra regressão marinha, dando origem às paleofalésias, e com o processo foram originando terraços Pleistocênicos sobre uma superfície de erosão. Por último, na penúltima transgressão marinha, deu origem às falésias durante o máximo do penúltimo interglacial presente na planície de Icapuí, pois nos demais trechos do litoral cearense foram totais ou parcialmente cobertos por dunas.

A descrição dos perfis das falésias segundo Miccadei et al., (2019) é de acordo com a classificação (Falésias ativas, inativas, paleofalésias e encostas) e sua composição (falésias de depósitos continentais, arenito conglomerados e arenosas). Os autores descrevem as falésias ativas com um perfil íngreme, e as falésias inativas, assim como as paleofalésias, com um perfil superior escarpado e a parte inferior suavizada caracterizada com cicatrizes de desmoronamentos pretéritos.

Além disso, em alguns pontos as falésias não apresentam apenas uma escarpa, ou uma quebra do relevo, chamados de patamares escalonados (Fig. 5). Os patamares se justificam pela diferença de composição das camadas, e assim, diferentes taxas de recuo. Podendo a parte superior ser classificada como uma *Bluff* e a inferior como *Cliff*.

4.2 Processos erosivos em falésias arenosas

Os processos erosivos em falésias arenosas são responsáveis pelo transporte transversal de sedimentos. Podem ser marinhos (solapamentos e desmoronamentos) e subaéreos (ravinamentos e voçorocamentos). Esses processos são responsáveis pela taxa de recuo das falésias costeiras, que é uma atividade natural podendo se intensificar com a intervenção antrópica, e criar áreas de risco e vulnerabilidade ambiental.

Uma costa de falésias compostas por material consolidado, a taxa de erosão é na ordem de milímetros/ano, enquanto falésias de material semiconsolidado apresentam taxas da ordem de centímetros/ano, ou mesmo em função de eventos episódicos na ordem de metros/ano (BIRD, 2008).

A erosão de falésias ativas por ações marinhas e climáticas é descrita em um estudo global chamado de GlobR2C2 (PREMAILLON et al., 2018), com 1530 falésias estudadas e mais de 1680 taxas de erosão estimadas, afirmando que a taxa de erosão média para falésias rochosas é de 2.9 cm/ano, para falésias com rochas médias de 10 cm/ano e falésias arenosas de 23 cm/ano.

De acordo com sua litologia, as rochas médias e fracas se enquadram nas falésias mapeadas do litoral Leste do Ceará. Mushkin et al., (2019) obtiveram resultados um pouco menores em um estudo de taxas de recuo recentes (anual-década) versus taxas de recuo antigas (centenário-milênar), variando entre 3 cm/ano e 9 cm/ano.

4.2.1 Processos erosivos subaéreos

Os processos erosivos subaéreos são compostos por sulcos, ravinamentos e voçorocamentos. Esses processos são ocasionados por fatores climáticos (chuvas, temperatura e vento), podendo imprimir alterações ao perfil das falésias (NASCIMENTO, 2006). Essas feições podem se desenvolver mais rapidamente ou mais lentamente de acordo com a composição litológica das falésias, sendo as sedimentares semiconsolidadas as mais vulneráveis aos processos de erosão subaéreos e marinhos.

Os processos subaéreos estão associados também ao escoamento superficial e subsuperficial. O superficial ocorre quando não há mais capacidade de infiltração do solo nos eventos de pluviosidade (GUERRA, 1994). Quando o topo das falésias é desprovido de cobertura vegetal, o impacto das gotas aumenta, desagregando o material e aumentando os efeitos erosivos do escoamento superficial (NASCIMENTO, 2006). A compactação do solo por pisoteamento, crescimento da malha urbana e ocupação também interferem na velocidade de escoamento superficial e aumento da erosão linear.

O escoamento subsuperficial gera instabilidade e favorece o fluxo, conseqüentemente ocorre a perda de material e um recuo diferenciado da fácies das falésias (DIAS e NEAL, 1992; FERNANDES e AMARAL apud GUERRA et al, 1996). Esse escoamento ocorre quando a água infiltra nas falésias, porém escorre em camadas internas, podendo desaguar na escarpa dos penhascos, criando fontes de água e exultórios nas falésias.

O escoamento superficial juntamente com altas temperaturas, ou seja, o processo de molhagem e secagem do terreno, a vibração por pisoteamento, movimentação de carros e instabilidade por ações tectônicas provoca rachaduras nas falésias em escala milimétrica chamada de sulco (Fig. 6), iniciando a erosão subaérea dos penhascos (SUGUIO, 2003). Quando os sulcos perdem parte do seu volume sedimentar alargando suas vertentes na ordem de centímetros pode-se chamar de ravina (Fig. 6).

As ravinas se iniciam como sulcos rasos que evoluem para escala centimétrica abrindo furos na superfície das falésias facilitando o escoamento superficial, que se juntam à medida que a água escorre sobre a superfície. A convergência de várias ravinas rasas aumenta o volume da água, que passa a ter grande energia erosiva, levando ao aprofundamento dos sulcos (ALBUQUERQUE, 2012).

Figura 6- Sulcos, ravinas e voçorocas em falésias arenosas semiconsolidadas, no qual as voçorocas estão sinalizadas com uma linha pontilhada, as ravinas com linhas e os sulcos com setas pretas. Além disso, é sinalizado a presença de *pipings* na escarpa das falésias, sinalizados com círculos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dependendo das condições hidrogeológicas e estratigráficas da área, o aumento do escoamento superficial por esses canais pode desencadear o surgimento de voçorocas (SUGUIO, 2003). Voçoroca é a remoção do solo de canais estreitos através da acumulação de escoamento superficial e pelo escoamento subsuperficial (GUERRA e GUERRA, 2006). Os processos de voçorocamentos são desencadeados por sistemas inadequados de cultivo e irrigação, sobre pastoreio, trilhas de transporte de madeira, construção de estradas e urbanização (VALENTIN et al., 2005).

Com o aumento da compactação do solo próximos a quebra do relevo em falésias arenosas, os níveis de voçorocamentos são maiores, comparado com áreas sem ocupação. Podem ser definidas também como o alargamento das ravinas em escala métrica na superfície das falésias, e que dependendo das características altimétricas e litoestratigráficas podem ser utilizadas como forma de acesso à praia por frequentadores.

4.2.2 Processos erosivos marinhos

A hidrodinâmica ao longo da linha de costa é resultado da interação da ação das ondas incidentes, que arrebentam e geram fluxos, associados à variação vertical e horizontal do nível da água provocados pelas marés (WRIGHT e SHORT, 1984;

CALLIARI et al., 2003). Tais processos estão relacionados à mudança na morfologia das praias. Essa hidrodinâmica atuando constantemente na base das falésias retira esses sedimentos e formam cavidades denominadas de solapamentos (Fig. 7).

Figura 7– Solapamento com linhas pontilhadas nas falésias que possui base de arenitos cimentados e topo arenoso, formando uma pequena caverna e indicando uma área de risco neste local. A foto é de um ponto nas falésias da praia de Morro Branco, Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor.

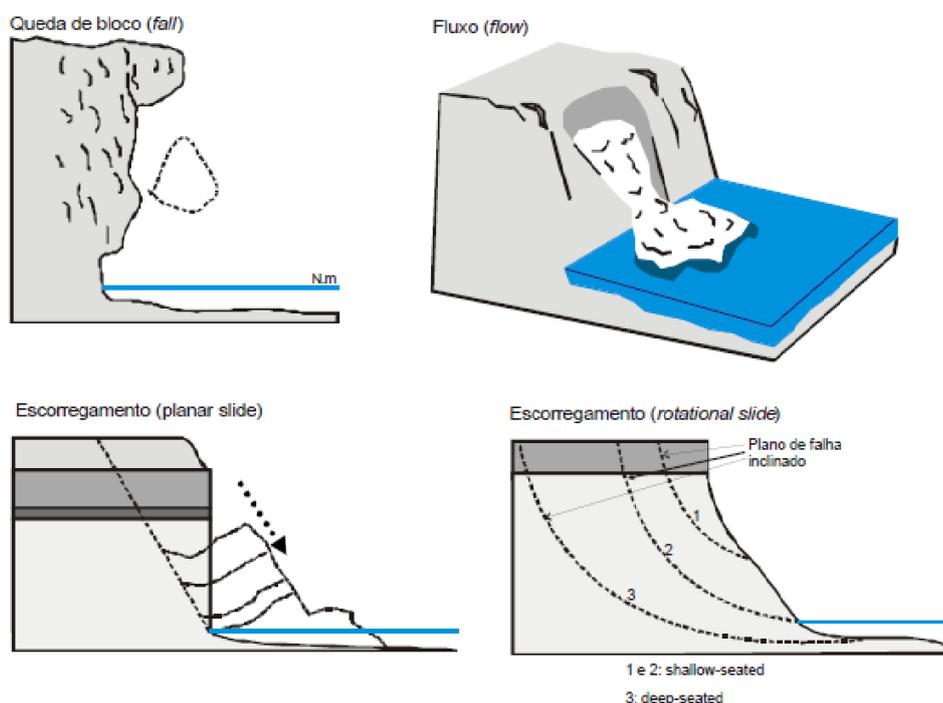
Solapamento é a escavação na base das falésias provocada pela ação abrasiva das ondas, ocasionando, posteriormente, o desmoronamento do material sobrejacente (SUGUIO, 2003). Esse estágio marinho erosivo é utilizado como indicador de área de risco, pois precede aos desmoronamentos da porção superior. Com isso, a área da praia adjacente a solapamento de falésias é classificada como uma área de risco temporária até que ocorram os movimentos de massa dos sedimentos ou rochas superiores.

Os movimentos de massas estão diretamente relacionados ao perfil que essa escarpa vai apresentar, principalmente em sua base. É a partir da instabilidade gerada pela erosão no sopé das falésias que são desencadeados movimentos de massas que causarão mudanças significativas, e em curto período no perfil das falésias (EMERY & KUHN, 1980; SUNAMURA, 1992).

Os movimentos de massas descritos por Nascimento (2006) são a queda de blocos, fluxos e escorregamentos (Fig.8). A queda de blocos é caracterizada por movimentos rápidos de blocos completos (de solo coeso ou rocha) que despenca pela ação

gravitacional em queda livre. Os fluxos são movimentos lentos nos quais os materiais se comportam como fluidos, observado em falésias de material pouco coeso, ou mesmo tendo seu início na desintegração de um material originalmente deslocado por escorregamento. Os escorregamentos caracterizam-se por movimentos de curta duração com plano de ruptura definido a ponto de ser possível distinguir o material deslizado e aquele não movimentado, formando cicatrizes na escarpa das falésias.

Figura 8- Movimentos de massa classificados em queda de blocos, fluxo e escorregamento (Planar e rotacional).



Fonte: Nascimento (2006).

Nascimento (2006) segue descrevendo os dois tipos de escorregamentos, divididos com base na forma do plano de ruptura, nomeados de translacionais e rotacionais. O translacional é mais frequente, pois possui superfície de ruptura com forma planar e é geralmente comprido e raso, o rotacional possui uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual se dará o movimento rotacional do material, tem seu início associado a cortes na base.

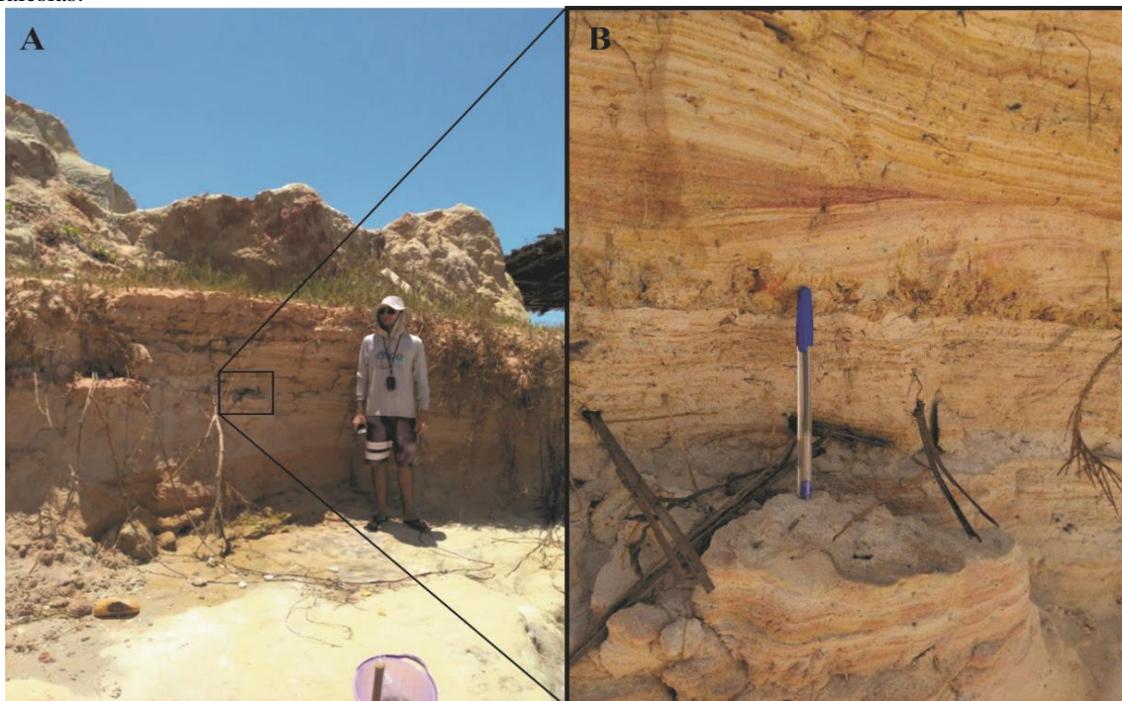
Após o desprendimento de blocos ou escorregamentos os sedimentos desagregados são dispostos na região adjacente chamada de pós-praia (BIRD, 2008), e dependendo da composição desses sedimentos, a erosão contribui para o transporte e balanço sedimentar da praia. Além disso, os desmoronamentos marcam as áreas estáveis e instáveis. Após um desmoronamento, a área adjacente passa por um período estável,

com perfil suavizado próximo a base, até que todo o sedimento erodido das falésias seja transportado pelas correntes e marés.

Como os solapamentos e desmoronamentos em falésias ativas são processos erosivos cíclicos, dependendo das características oceanográficas da região, e litoestratigrafia do material, terá velocidade mais rápida (semestral) ou mais lenta (anual). Essa ciclicidade pode deixar na faixa de praia adjacente estratigrafia de resquícios de desmoronamentos pretéritos (Fig. 9a), podendo indicar períodos de maior ou menor deposição de sedimentos.

Devido a coloração alaranjada e avermelhada das falésias do litoral leste cearense, é possível notar quantos ciclos de desmoronamentos pretéritos ocorreram (Figura 9b). Quando a linha de sedimentos de uma coloração for mais grossa, pode indicar um ciclo mais chuvoso ou com ações erosivas marinhas mais intensas (como, por exemplo, períodos de *swell*). Entre uma linha alaranjada/avermelhada e outra, existe uma linha branca, indicando os sedimentos mobilizados da região da antepraia para a pós-praia e/ou estirâncio.

Figura 9– A) Estratigrafia de depósitos resultantes de desmoronamentos pretéritos na praia de Morro Branco (Beberibe, CE); B) Linhas estratigráficas dos antigos desmoronamentos marcados na base das falésias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Falésias da Formação Barreiras

A Formação Barreiras, unidade estratigráfica de idade terciária que se estende pelo litoral brasileiro desde Búzios (RJ) até o Amapá. Matoso & Robertson (1959) apud Moura-Fé (2014) apresentam uma análise sobre o uso geológico do termo "Barreiras" nos trabalhos publicados no século passado, no qual:

"Os termos 'Grupo Barreiras', 'Formação das Barreiras' e 'Séries das Barreiras' vêm sendo usados indistintamente no Brasil para designar todas as rochas não consolidadas que recobrem o cristalino ou que parecem ter sido depositadas discordantemente sobre rochas de idade cretácea estendendo-se com numerosas interrupções desde o estado do Rio de Janeiro até o Pará e penetrando no vale Amazônico até a fronteira da Colômbia, Peru e Bolívia. Os fósseis são raros ou escassos" e em apenas uma ou duas localidades encontram-se plantas fósseis que permitiram atribuir-lhe a idade pliocênica".

O Grupo Barreiras constitui uma cobertura sedimentar terrígena continental e marinha (ARAI, 2006) de idade miocênica a pleistocênica inferior (SUGUIO e NOGUEIRA, 1999), é composto por diversas Formações, e os autores divergem em relação à distinção e nomenclatura de suas Formações. Mabesoone et al (1971) descreve quatro Formações dentro do Grupo Barreiras, são elas da mais antiga para a mais recente: Guararapes, Faceira, Macaíba e Potengi. Arai (2006) sugeriu a divisão do Grupo Barreiras em duas subunidades, o "Barreiras inferior" teria sido depositada durante a subida eustática do nível de mar no Mioceno, e o "Barreiras superior" de idade Pleistocena inferior.

Devido às divergências de terminologias por pesquisadores da área a respeito do Barreiras, neste trabalho é adotado o termo "Formação Barreiras" para referir-se às falésias do litoral cearense. A Formação Barreiras é a unidade estratigráfica mais contínua da margem continental do Brasil e tem sido associada aos tabuleiros litorâneos, uma feição geomorfológica aparentemente não deformada (BEZERRA, 2011). Descrita por Mabesoone et al., (1971), ocorre em uma sequência notável e contínua de sedimentos, pouco ou não consolidados, variegados, de litologia variando entre argilas e arenito conglomerados, apresentando normalmente uma estratificação irregular e indistinta. Essa sequência é bem delimitada dentro da coluna estratigráfica e repousa sobre o embasamento cristalino, formações cretáceas e formações terciárias marinhas, destacada da lapa por uma discordância de erosão bem pronunciada.

Em relação à deposição e origem da Formação Barreiras na zona costeira Leste do Brasil, Dominguez (2011) afirma que começou a adquirir uma morfologia mais próxima dos dias atuais durante o Mioceno (Cerca de 26 Ma), o nível de mar alto do Mioceno Médio-Inferior inundou a borda dos continentes e favoreceu a deposição da Formação Barreiras, que se deu principalmente em ambientes transicionais, incluindo fácies sedimentares depositadas em estuários, deltas, planícies de maré, praias etc.

O autor op.cit segue explicando a deposição da Formação Barreiras ao longo do Quaternário durante os breves períodos de nível de mar alto as ondas esculpiram e fizeram recuar, principalmente nos interflúvios, falésias na Formação Barreiras. Num destes breves períodos de nível de mar alto (MIS9 ou MIS11) depositaram-se acumulações arenosas ao longo da linha de costa da época, que em alguns trechos sobreviveram ao retrabalhamento dos níveis de mar altos posteriores. O topo desses depósitos foi retrabalhado pelo vento, originando dunas que em vários locais capearam as falésias da Formação Barreiras, como por exemplo no litoral norte da Bahia.

Em relação à Formação Barreiras presente no litoral Leste do Ceará e na parte setentrional do Rio Grande do Norte, apresenta idade de deposição no período do Mioceno entre 16 e 26 Ma, sugerindo que a região do interior (Planalto da Borborema) e do litoral (Planícies e Tabuleiros Costeiros) estava sobre um clima quente e úmido neste intervalo de tempo do Mioceno (LIMA, 2008). Essas falésias podem ter altitudes variando, por exemplo, entre 13 metros no litoral leste do Ceará (SILVA, 2017) a 200 metros como na Serra do Mel - RN (MAIA e BEZERRA, 2014). Por outro lado, as formações quaternárias como terraços fluviais e sedimentos costeiros destacam-se tipicamente pelo fato de as mesmas não mais constituírem um capeamento extenso e contínuo, apresentando-se como formações locais, de litologia diferente.

Uma dessas litoestratigrafias descritas como areias argilosas mal selecionadas, de coloração avermelhada, amarelada ou creme derivados de paleodunas estão presentes na camada superior das falésias de Icapuí (leste do Ceará) e das falésias do Rio Grande do Norte, chamada de Formação Potengi (SOUSA et al., 2008b; LIMA, 2011; SOUZA, 2017) e é associada à sedimentos de paleodunas e está classificado como depósitos "Pós-Barreiras".

4.3.1 Falésias do "Pós-Barreiras"

Em algumas partes do Brasil, associadas a sedimentos da Formação Barreiras, existe essa unidade sedimentar superior que é referenciada em alguns estudos no Brasil como sedimentos "Pós-Barreiras". O termo "Pós-Barreiras" é usado genericamente para se referir a sobreposição de sedimentos nos planaltos costeiros das Formações de Barreiras. Eles consistem em uma unidade geológica de transição, de maneira discordante da Formação Barreiras, e às vezes são caracterizados como arenito conglomerados de sedimentos com areia e argila intercaladas (ROSSETTI et al, 2011; ROSSETTI et al, 2013) ou principalmente areia (COHEN et al, 2008; TATUMI et al, 2008).

Essa deposição "Pós-Barreiras" é descrita como Formação Macaíba por Mabesoone et al (1971), Indiviso pela CPRM (2003), Formação Potengi por Sousa et al., (2008), foi chamada de Infra Barreiras. A descrição feita por Mabesoone et al (1971) é a que mais se aproxima dos sedimentos "Pós-Barreiras" do litoral do Ceará, que são sedimentos inconsolidados, afossilíferos, que ocorrem praticamente por toda a faixa costeira. Constituem-se essencialmente de areias limpas, de coloração creme amarelada e avermelhada.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2003) classificou os sedimentos "Pós-Barreiras" em Indiviso, classificando como areno argilosos de tonalidade variegada (amarelada, avermelhada e esverdeada), matriz argilo-caulinítica, com cimento ferruginoso e, às vezes, silicoso. Sua litologia apresenta granulação fina a média, com leitos conglomeráticos e nódulos lateríticos na base (pode-se encontrar, no topo, areias sílticas bem classificadas) e ambiente sedimentar sistema fluvial com esporádicas corridas de lama.

Alguns autores divergem sobre se essa nomenclatura "Indiviso" seria adequada para nomear esse pacote sedimentar, pois o significado da palavra é que não possui divisão. Porém, toda a sucessão sedimentar "Pós-Barreiras" mapeada como Indiviso é encontrada no Norte e Nordeste do país e possui algumas divisões. Rossetti et al (2001) no litoral de Zona Bragantina no Pará, encontrou três unidades estratigráficas de origem continental e fluvial. Sanabria et al., (2015) descreve os sedimentos "Pós-Barreiras" na região sul da Bahia associados ao transporte eólico e neotectônica. Gandini et al., (2014) na região de João Pessoa-Paraíba, descreveu 5 fácies dos depósitos "Pós-Barreiras".

Rossetti et al., (2008) definiu como "Sedimentos "Pós-Barreiras"" uma camada litoestratigráfica no Norte do Brasil composta por sedimentos siliciclásticos

arredondados, além de arenitos e argilitos ferruginosos de idade Pliocênica. Esta camada corresponde ao pacote sedimentar "Pós-Barreiras" presente nas falésias do litoral leste do Ceará (Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí) e seguindo pela Bacia Potiguar no litoral setentrional do Rio Grande do Norte.

Os sedimentos "Pós-Barreiras" são encontrados apenas em algumas áreas da costa do Brasil, concentrado principalmente no norte e nordeste brasileiro (ROSSETTI et al, 2001; TATUMI et al, 2008; ROSSETTI et al., 2011; ROSSETTI et al., 2013; GANDINI et al., 2014; SANABRIA et al., 2015; SOUZA et al., 2016; SOUZA et al., 2016a). São registrados em áreas elevadas e não consistem na unidade sedimentar da planície costeira do Período Quaternário, comum ao longo da costa brasileira. Estudos indicam que a pilha sedimentar "Pós-Barreiras" pode ter dezenas de metros de espessura, e a cota altimétrica atual pode estar relacionada a processos neotectônicos posteriores à deposição (ROSSETTI et al, 2013; GANDINI et al, 2014).

Existe uma falta de consenso sobre a origem e a idade dos depósitos de areia, segundo Tatum et al., (2008) deve-se ao fato de, durante um tempo, essas coberturas serem resultado do intemperismo de sedimentos da Formação Barreiras. Além disso, o material arenoso é bastante desgastado pelo clima e é difícil obter datação radiogênica confiável. No entanto, o método de luminescência opticamente estimulado é o mais adequado para esse tipo de depósito sedimentar recente e afossilíferos (TATUMI et al., 2008; GANDINI et al., 2014; SOUZA et al., 2016a).

4.4 Vulnerabilidade

Vulnerabilidade é a característica de quem ou do que é vulnerável, ou seja, frágil, delicado e fraco. O conceito de vulnerabilidade tem sido uma poderosa ferramenta analítica para descrever estados de suscetibilidade (relacionadas aos aspectos físicos do ambiente) ao dano, impotência e marginalidade dos sistemas físico e social, e para orientar a análise normativa de ações para melhorar o bem-estar através da redução de risco (ADGER, 2006).

Considera-se que a suscetibilidade está vinculada somente às condições físicas do meio, ou seja, trata da intensidade ou probabilidade de um determinado ambiente sofrer impacto devido a um perigo natural (UNDP, 2004). Já a vulnerabilidade surge como consequência da exposição aos estresses associados às mudanças ambientais e sociais e à ausência de capacidade de adaptação. Assim, numa avaliação de vulnerabilidade busca-

se localizar pessoas e lugares sob risco e identificar quem nesse espaço é mais vulnerável (ISDR, 2004).

Um cálculo de vulnerabilidade considera estudar e analisar variáveis como geologia, geomorfologia, topografia, mudança da linha de costa, exposição da linha de costa, elevação relativa do nível do mar, altura significativa de onda, média amplitude das marés e uso da terra (MAHAMOUD et al, 2022), além de tempestades em escala regional (BOSON e JIMÉNEZ, 2011), mudanças climáticas e elevação do nível do mar (BRAY e HOOKE, 1997; GUTIERREZ et al, 2011; PRUSZAK E ZAWADZKA, 2005; KOROGLU et al, 2019; PRADEEP et al, 2022).

A estimativa de um aumento no nível do mar entre 0,3 metros e 1,1 metros até 2100, dependendo das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2018), converge para a maior atenção na vulnerabilidade da zona costeira frente aos cenários previstos. Logo, são necessários estudos que levam à compreensão dessa faixa de interação entre os ambientes continental e oceânico, bem como sua gestão e utilização de forma efetiva e segura.

Estudos de vulnerabilidade em falésias usa trabalho de campo, sensoriamento remoto, ferramentas de sistema de informação geográfica (GIS) e uso do solo para destacar a exposição dos ativos humanos nas áreas do entorno, além das variáveis citadas anteriormente. Trabalhos foram publicados na França (DAIGNEAULT et al, 2014), em Yorkshire no Reino Unido (BARKWITH et. al, 2014), no Peru (SALINAS e CASTANEDA-OLIVERA, 2022), no Canadá (BEARDSELL et al, 2017), na ilha de Ngazidja, Arquipélago de Comores, próxima da costa da África, à entrada do Canal de Moçambique (MAHAMOUD et al, 2022).

No Brasil, o estudo de vulnerabilidade descrito por Muehe (2010, p.177) detalha que

"Do ponto de vista geomórfico, as alterações provocadas pela subida do nível do mar serão pequenas nos próximos 20 anos, mantendo-se mais ou menos as tendências atuais. No entanto, devido ao aumento significativo da temperatura previsto para o final do século, espera-se que os processos geomórficos se intensifiquem, a partir de meados do século, como resultado tanto da elevação do nível do mar quanto da intensificação e frequência da ciclogênese subtropical. Esta ciclogênese está associada ao aumento da temperatura da água do mar, alterações do nível do mar, aumento do transporte eólico e desestabilização dos campos de dunas.

A subida do nível do mar aumentará a erosão das falésias, processo lento cuja velocidade depende da coesão do material e da quantidade de sedimentos libertados e mantidos no perfil. Muitas das falésias que ainda estão ativas provavelmente representam um ajuste incompleto relacionado à transgressão pós-glacial e não o resultado de uma recente elevação do nível do mar.

A linha de costa brasileira está sofrendo erosão ao longo de toda a costa, mas a erosão é distribuída de forma irregular e muitas vezes associada às desembocaduras dos rios. Grandes segmentos da costa são formados por falésias sedimentares em áreas de baixa ocupação onde a erosão é lenta.

As áreas de risco já detectadas serão ampliadas pelo aumento do nível do mar e pelo aumento da frequência e intensidade das tempestades associadas à elevação da temperatura do oceano. Esses riscos serão mais significativos nas áreas urbanas e especialmente nas grandes cidades costeiras.”

As opções de adaptação que reduzem a vulnerabilidade dos sistemas humanos e naturais têm muitas sinergias com o desenvolvimento sustentável, se bem gerenciadas, tais como garantir a segurança alimentar e hídrica, reduzir os riscos de desastres, melhorar as condições de saúde, manter os serviços ecossistêmicos e reduzir a pobreza e a desigualdade (alta confiança). O aumento do investimento em infraestrutura física e social é uma condição fundamental para melhorar a resiliência e as capacidades adaptativas das sociedades. Esses benefícios podem ocorrer na maioria das regiões com adaptação a 1,5°C de aquecimento global.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS

5.1 MAPEAMENTO LIDAR NAS FALÉSIAS COSTEIRAS DO LESTE CEARENSE (NORDESTE DO BRASIL) ¹

Resumo

As falésias costeiras representam cerca de 80% da linha de costa mundial e se classificam de acordo com a influência marinha em sua base em duas categorias: ativas e inativas. No estado do Ceará, Nordeste do Brasil, as falésias situam-se em maior proporção no litoral leste. Com isso, o objetivo do estudo foi de mapear e quantificar as falésias ativas e inativas da zona costeira costa leste cearense focando na litologia, geologia e geomorfologia de topo e das escarpas, através de imagens de alta resolução de LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e Ortofotos. O resultado do estudo mostra que 40% da linha de costa leste do Ceará é composta por falésias ativas e/ou inativas, ou seja, 73.83 km de falésia no litoral, totalizando 36.7 km de falésias ativas e 39.64 km de falésias inativas. Apresentando feições como voçorocas bem desenvolvidas nas duas classificações de falésias, identificação de uma erosão remontante e patamares escalonados em uma praia com falésias ativas, relacionados à erosão diferenciada subaérea e neotectônica da região.

Palavras-chave: Lidar; Voçorocas; Patamar Escalonado; Erosão Remontante.

5.1 Introdução e hipótese

A zona costeira é composta por feições arenosas e arenítica fortemente cimentadas de diversas morfologias. As falésias são uma feição escarpada (SUNAMURA, 1992) presente em aproximadamente 80% da linha de costa mundial (TRENHAILE, 1987), e composição associada a rochas sedimentares, ígneas e metamórficas (BIRD, 2008), de constituição arenítica fortemente cimentada, sedimentar, calcária e de gelo.

As falésias estão classificadas em dois grupos de acordo com a influência marinha atuante em sua base, são elas as falésias ativas ou falésia costeira (EARLIE et al., 2015; GALILI & ZVIELY, 2018), e falésias inativas ou paleofalésias. As ativas possuem influência marinha na sua morfologia, formando escarpas erodidas pela ação marinha na base (LEITE et al., 2016) e modelando seu perfil através da interação de outros agentes marinhos e subaéreos (MOORE et al., 2010; MARRERO et al., 2018). A evidência de uma escarpa inativa com uma linha de costa emergente em frente a ela parece ser uma evidência conclusiva de uma falésia "fóssil" ou "morta" (GUILCHER, 1958).

¹ Artigo publicado em 2020. Silva, R.R.; Pinheiro, L.S.; Ximenes Neto, A.R.; Morais, J.O. Geociências, v. 39, n. 2, p. 463 - 479, 2020. ISSN: 1980-900X (online)

Neste artigo, fazemos a distinção entre (1) falésias inativas e (2) paleofalésias seguindo a denominação feita por Miccadei et al. (2019) que caracteriza a (1) Falésia inativa em uma escarpa vertical variando de 15 m a 25 m de altura, possuindo uma barreira que restringe temporariamente os efeitos da erosão marinha, como depósitos de rocha na base ou barreiras antrópicas. As (2) paleofalésias estão entre 15 m a 50 m de altura, descritas como falésias que possuem uma distância de centenas de metros para a linha de costa atual restringindo permanentemente os efeitos da erosão marinha. Com isso, é utilizado o termo paleofalésias para denominar as falésias que não possuem erosão marinha atuante em sua base. As paleofalésias podem se formar no interior do continente (DOMÈNECH et al., 2018), por depressões (FINZI & HARLEV, 2016;) ou por flutuação do nível do mar (BAL, 1997; EALEY & JAMES, 2001).

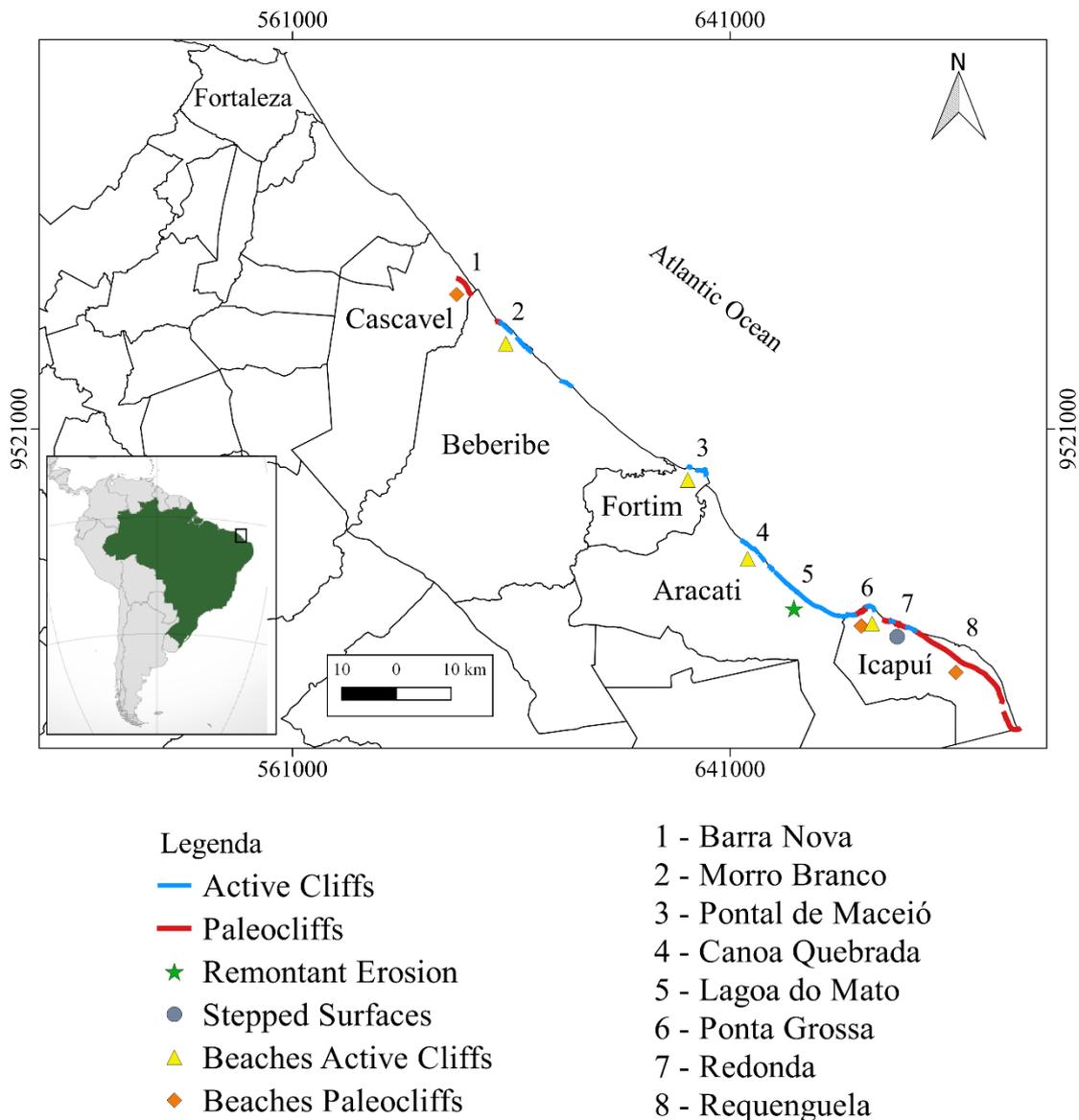
As falésias no Brasil ocorrem ao longo do litoral e se estendem desde a região amazônica, por toda região costeira norte e nordeste, até o Sudeste no Rio de Janeiro (NUNES et al., 2011), feições que estão associadas principalmente ao Grupo Barreiras de idade Miocênica (LIMA, 2008; MAIA, 2012).

O compilado de trabalhos designa o termo “Barreiras” em Série, Grupo ou Formação. Porém os termos “Série” e “Formação” são impróprios, em virtude do desconhecimento dos limites da sua sedimentação no tempo geológico. O termo “Grupo Barreiras” é usado para designar a litoestratigrafia, pois o termo “Grupo”, se trata de um conjunto de duas ou mais formações (SUGUIO, 1998).

Uma área das falésias arenosas atualmente está inserida em Unidades de Conservação (UC's). As falésias do município de Beberibe constituem o Monumento Natural das Falésias com uma área de 31.29 hectares e protegida pelo Decreto nº 27.461 de 04/06/2004.

Este monumento representa uma unidade de conservação de proteção integral e uso restrito a visitação e contemplação paisagística. Outras unidades de conservação das falésias do litoral leste são a Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada (Aracati) e a Área de Proteção Ambiental da Praia de Ponta Grossa (Icapuí), porém por estar dentro da categoria de uso sustentável, a efetiva proteção contra impactos ambientais é branda.

Figura 10- Mapa de localização da área de estudo, os municípios do litoral leste do Ceará que possuem falésias (Cascavel, Beberibe, Fortim, Aracati e Icapuí), identificando as áreas de falésias ativas, paleofalésias, pontos que possuem voçorocas e as principais praias citadas no estudo.



Fonte: Silva et al., (2020).

Devido à ocupação crescente em zonas costeiras, a especulação imobiliária, o crescimento do geoturismo que utiliza estas feições geológicas como atrativos principais e maior representatividade no litoral leste do Estado, este estudo propôs mapear e quantificar todas as falésias ativas e inativas da zona costeira leste cearense, através de imagens de alta resolução de LiDAR (*Light Detection And Ranging*) e Ortofotos, focando na geologia e geomorfologia de topo e das escarpas.

Os estudos de alta resolução que utilizam LiDAR em falésias abrangem o mapeamento e identificação geomorfológica de voçorocas (GODIN et al., 2019),

levantamento e classificação de entalhes marinhos (TEREFENKO et al., 2018) monitoramento e análise (KUNH & PRÜFER, 2014; MICCADEI et al., 2019; TEREFENKO et al., 2019) e cálculo de taxas de erosão (ROSSER et al., 2015; ESPOSITO et al., 2018; MUSHKIN et al., 2019).

Com isso, a hipótese norteadora do capítulo foi que as falésias do litoral leste do Ceará são ativas e paleofalésias, possuindo o mesmo material sedimentológico e uma erosão subárea atuante.

5.2 Metodologia

Foram analisados os 184 km ao longo da linha de costa no leste do Ceará, separadas em cinco municípios que fazem fronteira com o mar (Cascavel, Beberibe, Fortim, Aracati e Icapuí). Para a análise foi combinado (1) a interpretação das imagens Lidar; (2) as Ortofotos de alta resolução espacial e (3) geologia e geomorfologia local. Com a compilação dos dados foram identificadas as áreas com falésias ativas e paleofalésias, feições erosivas e formas do topo e escarpa.

A análise teve como objetivo identificar e mapear as formas, encostas, áreas planas e escarpas das falésias. A pesquisa foi baseada em uma abordagem geomorfológica dos assentamentos rochosos e superficiais e de declive, descritos na literatura nacional e internacional.

5.2.1 Aquisição dos Dados

As imagens Lidar (*Light Detection And Ranging*) e as Ortofotos foram adquiridos na Superintendência Estadual de Meio Ambiente do Ceará (SEMACE), relativo à Área 2 – 472 km² (litoral leste do Estado, entre os municípios de Cascavel e Icapuí) com escala de 1:10.000. Todos os produtos gerados do aerolevantamento atendem a precisão altimétrica do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) - Classe A (Decreto Federal nº 89.817 de 20 de junho de 1984). Esse levantamento foi fruto do Zoneamento Econômico Ecológico (ZEE) da zona costeira, que tem como objetivo conhecer o estado de ocupação e conservação da Faixa Litorânea e Unidades de Conservação Costeiras do Estado do Ceará.

Além das imagens do Lidar foram adquiridas junto ao mesmo órgão e mesmo projeto, Ortofotos com resolução espacial de 0,35 metros – 472 km². O Modelo Digital

de Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Superfície (MDS) foram segmentados em 61 recortes em uma articulação de blocos de 5 km x 5 km alinhados com as coordenadas UTM, Fuso 24S, DATUM SIRGAS 2000, com resolução espacial de 0,5 m. Os arquivos que compõem o MDT foram gerados nos formatos ASC II e em IMG (SEMACE, 2014).

5.2.2 LiDAR

O princípio de funcionamento do sistema de perfilamento por varredura aerotransportado a Laser – ALS (*Airborne Laser Scanning*) ou sistema aerotransportado de laser para mapeamento do terreno – ALTM (*Airborne Laser Terrain Mapper*), também conhecido, como altímetro Laser LIDAR (*Light Detection And Ranging*), de acordo com SEMACE (2014) está baseado na emissão de multifeixe de Laser no espectro infravermelho em direção à superfície terrestre. Na superfície, estes feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e captados pelo sensor.

Para cada feixe emitido é registrado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave. A partir do tempo de percurso do laser é possível determinar a distância percorrida utilizando para tal a velocidade da luz.

A posição, orientação e variação da altitude da aeronave são combinadas, então, através de métodos de processamento para produzir uma posição tridimensional na superfície da Terra que foi atingida por cada pulso Laser.

Uma vez processada a combinação dos dados registrados pelo Laser Scanner, pelo Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e pelo sistema de referência inercial – IMU (*Inercial Measurement Unit*) ou INS (*Inertial Navigation System*) na aeronave.

Este sistema é acoplado ao IMU, que integra e armazena os dados GNSS de dupla frequência e do INS, referentes à posição e altitude da aeronave (Wehr & Lohr, 1999).

O sistema de perfilamento a Laser constituiu-se, então, na integração de sensores e equipamentos no avião onde os ecos de Laser emitidos em intervalos regulares foram armazenados em um computador de bordo e depois repassados para outro computador de escritório, onde foram analisados e processados.

Com relação ao Perfilamento Laser para a Área 2, o mesmo foi feito a uma velocidade de 80 knots ou 148 km/h a uma altura média de 1250 m ou 4100 pés acima do nível do mar, com a utilização do sensor RIEGL LMS-Q680i com taxa de repetição do pulso de 80 Khz PRR. Velocidade de voo de 68 m/s nos dias 08, 10, 22, 23 e 24 de Junho e 04 e 05 de julho de 2014 (SEMACE, 2014).

5.2.3 Ortofotos

A Ortofoto é a foto corrigida de todas as deformações presentes na fotografia aérea, decorrentes da projeção cônica da fotografia – que dá a foto um aspecto distorcido, como se a imagem tivesse sido arrastada do centro para as bordas da foto – e das variações do relevo, que resultam em variação na escala dos objetos fotografados. A Ortofoto equivale geometricamente ao mapa de traço, todos os pontos se apresentam na mesma escala, podendo seus elementos ser medidos e vetorizados com precisão. É possível medir distâncias, posições, ângulos e áreas, como num mapa qualquer.

Essa correção segue o princípio da Retificação Diferencial que consiste em transferir tons da fotografia aérea para uma malha regular representando a projeção ortogonal do terreno. Participaram deste processo a calibração da câmera, os parâmetros de orientação das aerofotos, o Modelo Digital do Terreno e pontos de ligação de detalhes homólogos entre fotos. O MDT permitiu a determinação da cota Z correspondente a cada pixel da Ortofoto digital.

A ortoprojeção foi realizada pelo software especialista TerraPhoto que garante a boa qualidade dos produtos. Nos casos em que uma Ortofoto exigiu composição por mais de uma imagem, foi aplicada a mosaicagem.

Os mosaicos foram cortados em blocos de 5 x 5 km no formato GEOTIFF/TFW e estão alinhados com as coordenadas UTM, Fuso 24, Hemisfério Sul, DATUM SIRGAS 2000, com resolução espacial de 0,35 m, os quais permitem a sobreposição dos vetores a fim de viabilizar a interpretação de detalhes e pormenores topográficos em escala final de 1:10.000 (SEMACE, 2014).

5.2.4 Mapeamento

O mapeamento e a vetorização foram realizados nos softwares QGis 2.18 e Global Mapper v.11.00 utilizando as imagens das Ortofotos e de Lidar. Para mapear as falésias foram criados arquivos vetoriais do tipo *shapesfiles* de linha, marcando a borda das falésias ativas e paleofalésias do litoral Leste. Durante o mapeamento minucioso, foram observadas e detalhadas feições morfológicas como voçorocas, patamares escalonados e erosão remontante na borda das falésias.

Foi feita a quantificação em quilômetros das falésias por município, distância das paleofalésias para a linha de costa atual, morfologia e perfil topográfico da escarpa.

Das voçorocas observadas nas falésias foram destacadas as duas maiores, que estão localizadas em duas praias relevantes para o litoral leste, devido ao alto potencial turístico, crescente urbanização nas últimas décadas e composição geológica facilmente erodida, nas praias de Morro Branco (Beberibe) e Canoa Quebrada (Aracati).

5.3 Resultados

Foi verificado que 40% da linha de costa do leste do Ceará é composta por falésias ativas e/ou paleofalésias (Fig. 10), ou seja, 74.33 km de falésia no litoral, totalizando 36.7 km de falésias ativas (19.37%) e 39.14 km de falésias paleofalésias (20.70%) (Tabela 1).

Com destaques para os municípios de Aracati e Icapuí, por apresentarem as maiores linhas contínuas de falésias ativas (18.45 km) e paleofalésias (33.64 km). Os municípios que apresentam falésias ativas, com ação marinha atuante na erosão da escarpa, são Fortim (4.37 km), Icapuí (6.11 km), Beberibe (7.74 km) e Aracati (18.45 km). Os que apresentam paleofalésias, ou seja, quando a ação marinha não atua na escarpa (apenas processos subaéreos), são Beberibe (1.7 km), Cascavel (3.8 km) e Icapuí (33.64 km) (Tabela 3, Fig. 10).

Tabela 3- Mapeamento, características morfológicas e litológicas das cinco áreas pesquisadas nas falésias costeiras. Identificando Ac como Falésias ativas e Pc como Paleofalésias.

	Cascavel	Beberibe	Fortim	Aracati	Icapuí
<i>Mapeamento</i>					
Falésias ativas (Ac)	-	sim	sim	sim	sim
Paleofalésias (Pc)	sim	sim	-	-	sim
Mapeamento Falésias ativas	-	7.74 km	3.37 km	18.45 km	6.11 km
Mapeamento Paleofalésias	3.8 km	0.7 km	-	-	33.64 km
Distância máx para a linha de costa	1391 m	166.8 m	-	-	3270 m
Distância média para a linha de costa	1186 m	74.95 m	-	-	745m
Voçorocas	168	Ac 534 Pc 28	38	1178	Ac 247 Pc 237
<i>Feições Morfológicas</i>					
Altura média	21.13 m	Ac 16.31 m Pc 14.62 m	5.9 m	19.75 m	Ac 32.48 m Pc 33.09 m
Altura máxima	27.63 m	Ac 24.86 m Pc 15.73 m	7.88 m	29.54 m	Ac 42.6 m Pc 46.82 m
Declividade máxima	70.54°	Ac 78.55° Pc 64°	73.13°	76°	Ac 78.37° Pc 70.54°
Declividade média	27.72°	42.54° 30.45°	32°	31.63°	Ac 43.21° Pc 34.39°
Patamar escalonado	-	-	-	-	sim

Fonte: Silva et al., 2020.

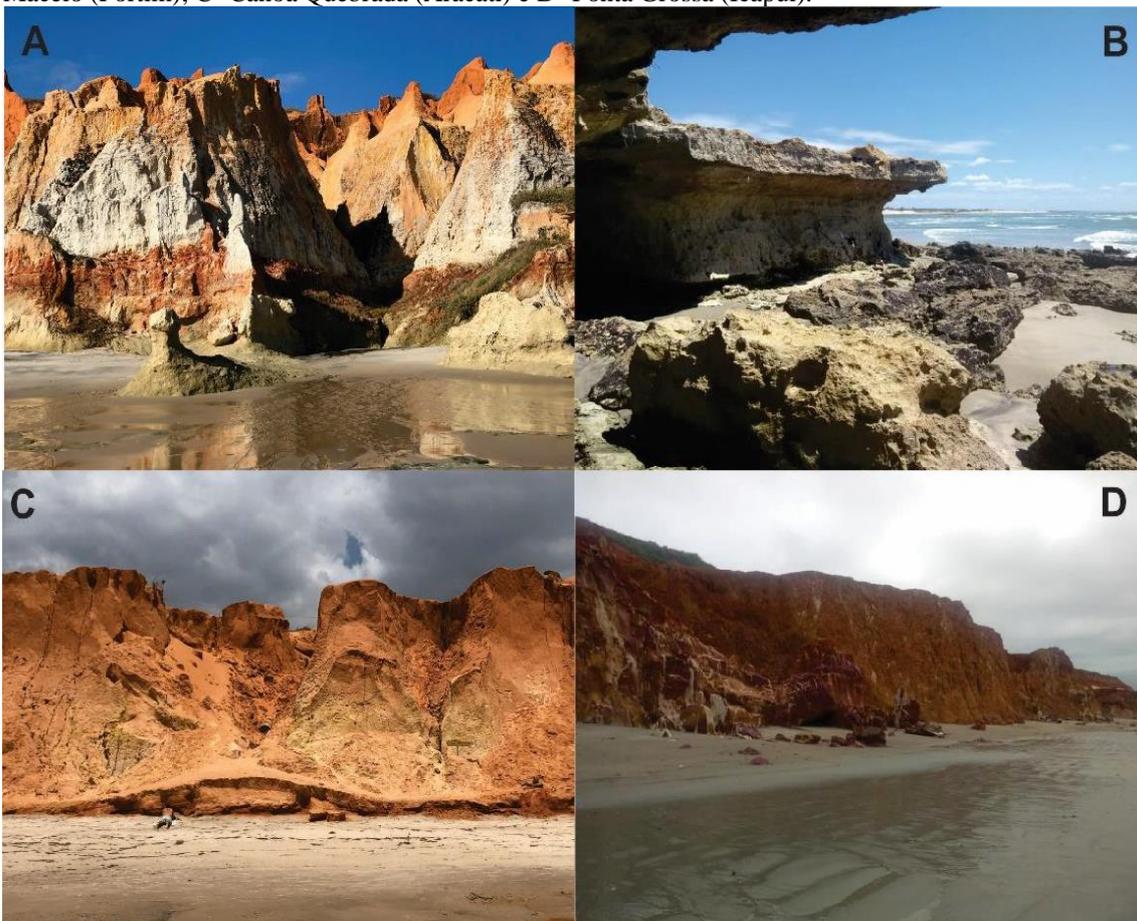
5.3.1 Falésias Ativas

A linha de falésias ativas se inicia no município de Beberibe, especificamente na praia de Morro Branco e Uruaú somando 7.74 km de extensão. Seguindo para o leste, elas ressurgem no município de Fortim, na praia de Pontal do Maceió, apresentando falésias de duas composições litoestratigráficas (Arenosa do "Pós-Barreiras" e arenítica mente cimentada da Formação Tibau), somando 4.44 km de extensão.

No litoral de Aracati são apresentadas a maior linha de falésias ativas contínua do Ceará, totalizando 18.45 km, ocupando 50.32% do litoral do município.

Essa linha de falésias ativas segue até o município de Icapuí por mais 6.11 km, e então essas falésias seguem caminho para dentro do continente tornando-se paleofalésias, que voltam a ser falésias ativas passando a fronteira do estado, no litoral do Rio Grande do Norte (Figura 11).

Figura 11- Falésias ativas do litoral leste do Ceará nas praias de A- Morro Branco (Beberibe); B- Pontal de Maceió (Fortim); C- Canoa Quebrada (Aracati) e D- Ponta Grossa (Icapuí).



Fonte: Silva et al., 2020.

Estas, são falésias, em sua maioria, de composição friável areno-argilosas originadas do Grupo Barreiras, facilmente erodidas por ações marinhas e climática, com presença de ravinamentos e voçorocamentos em toda sua extensão (Figura 2).

A altura máxima encontrada do pacote sedimentar das falésias ativas é de 42.6 m, e a altura média varia entre 5.9 m e 32.48 m (Tabela 3). No município de Icapuí encontramos as maiores elevações em falésias ativas, na praia de Ponta Grossa a altura máxima da escarpa das falésias alcançou 42.6 metros.

As outras falésias ativas apresentam altura máxima de 29.54 m (Aracati), 24.86 m (Beberibe) e, por último, as falésias mais baixas estão no município de Fortim, com 7.88 m (Tabela 3).

Então temos as falésias ativas mais baixas na porção oeste e a elevação vai subindo, em torno de 30 m, até alcançar as falésias mais altas na porção leste.

Em relação à declividade, os perfis das falésias ativas apresentam uma máxima variando entre 78.55° e 73.13° . Em relação a declividade média do perfil os valores variam entre 31.63° e 42.54° , devido a cicatrizes de desmoronamentos pretéritos que suavizam a região basal da escarpa. As elevações máximas foram de 78.55° em Beberibe, 78.37° em Icapuí, 76° em Aracati e 73.13° em Fortim.

As feições morfológicas formadas nas falésias ativas e observadas pelo mapeamento do Lidar são voçorocas bem desenvolvidas, solapamentos na base das falésias e os patamares escalonados.

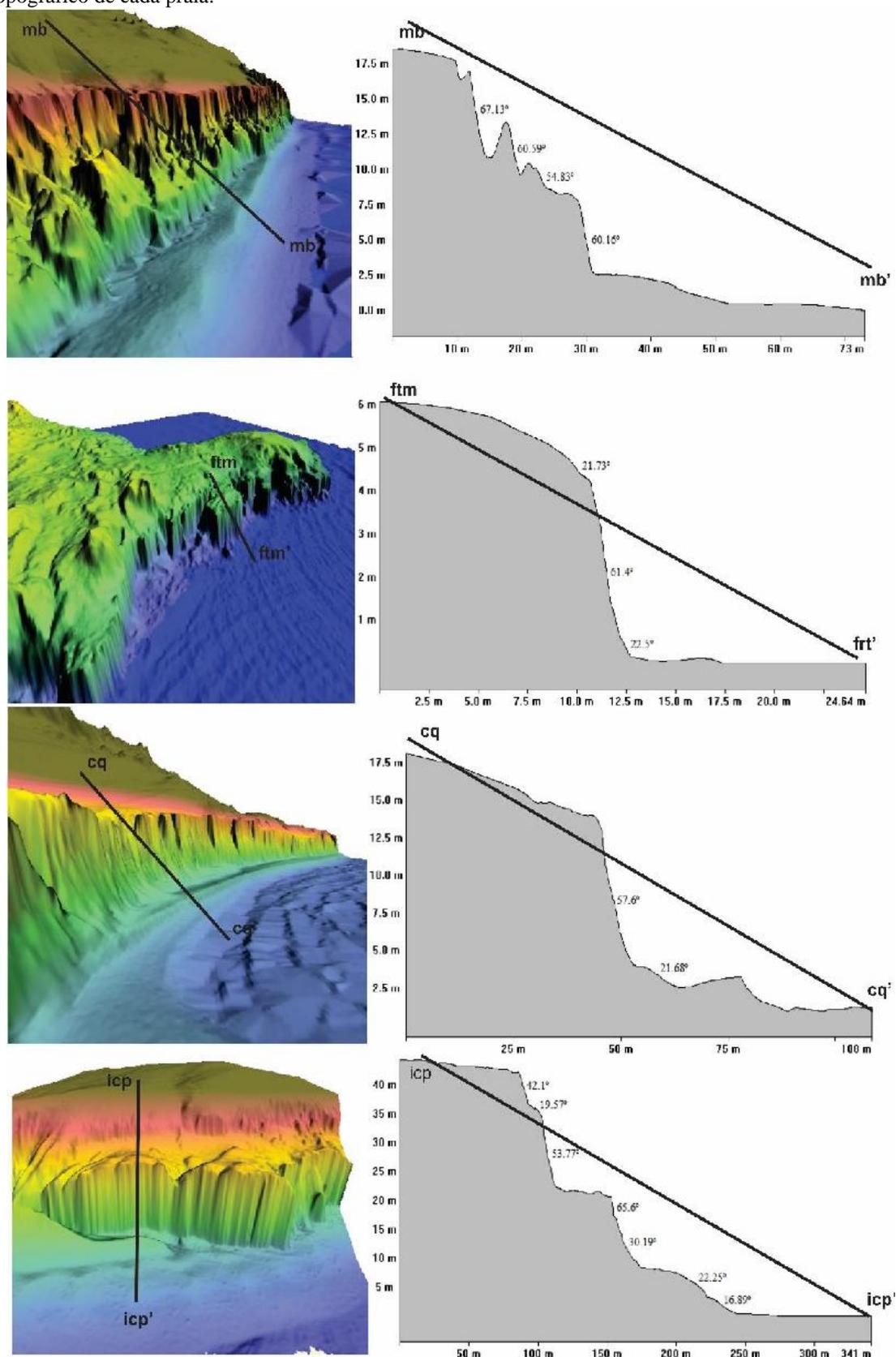
Estes ocorrem apenas no município de Icapuí, em uma extensão de 2.82 km de linha de costa, podendo ser observado na praia de Redonda. As escarpas deste patamar alcançam altura máxima de 46.82 metros e inclinação máxima de 74.82° (Figura 12).

Os patamares das falésias ativas na praia de Redonda (Icapuí) possuem diferentes litologias, no qual a superior é mais friável e erosiva dos depósitos "Pós-Barreiras", e a inferior é um arenito conglomerado firme da Formação Barreiras.

A camada superior está a uma altura média de 30.15 m e o patamar inferior à altura média de 15.84 m, a distância entre as duas camadas varia de 44.39 m e 5.74 m.

A distância da crista superior para a linha de costa varia de 25.2 m a 156.59 m, a declividade da camada superior varia de 65.51° e 35.89° , com média de 53.59° , a camada inferior possui declividade da escarpa variando entre 77.54° e 72.89° .

Figura 12- Perfis topográficos das falésias ativas (unidades de medida em metros e em graus) nos municípios de Beberibe (mb), Fortim (ftm), Aracati (cq) e Icapuí (icp), indicando o início e final do perfil topográfico de cada praia.



Fonte: Silva et al., 2020.

Por apresentarem duas camadas sedimentares distintas, a erosão subaérea ocorre de forma distinta, no qual na camada superior é comprovada com a existência de 231 voçorocas e 49 no inferior, estas possuem forma pequenas, com ravinas bem desenvolvidas, perpendiculares a linha de costa, e paralelas entre si. E na camada inferior é possível observar solapamentos na base das falésias, indicando uma área de risco a desmoronamentos e quedas de blocos.

5.3.2 *Paleofalésias*

As paleofalésias encontram-se em três municípios do litoral leste do Ceará, e são as maiores linhas de falésia do Estado com 39.04 km de extensão, no qual a maioria dessas falésias estão situadas no município de Icapuí, totalizando 33.64 km de linha de paleofalésias. Seguindo para oeste temos o município de Beberibe com 1.7 km de paleofalésias em duas praias (Morro Branco e Uruaú), e por último o município de Cascavel com 3.8 km de extensão. A distância máxima das paleofalésias para a linha de costa varia entre 166.8 m em Beberibe e 3270 m em Icapuí com presença de terraços marinhos indicando as antigas cristas praias, até a linha de costa atual.

A distância máxima no município de Cascavel é de 1391 m, isso indica as variações do nível do mar em alguns pontos na costa leste cearense (Figura 13).

As paleofalésias no município de Icapuí possuem vegetação no topo em quase toda sua extensão, assim elas puderam ser mapeadas devido à sobreposição dos dados de alta resolução do LiDAR. Com isso, a elevação máxima da escarpa é de 46.82 metros e a média é de 33.09 m.

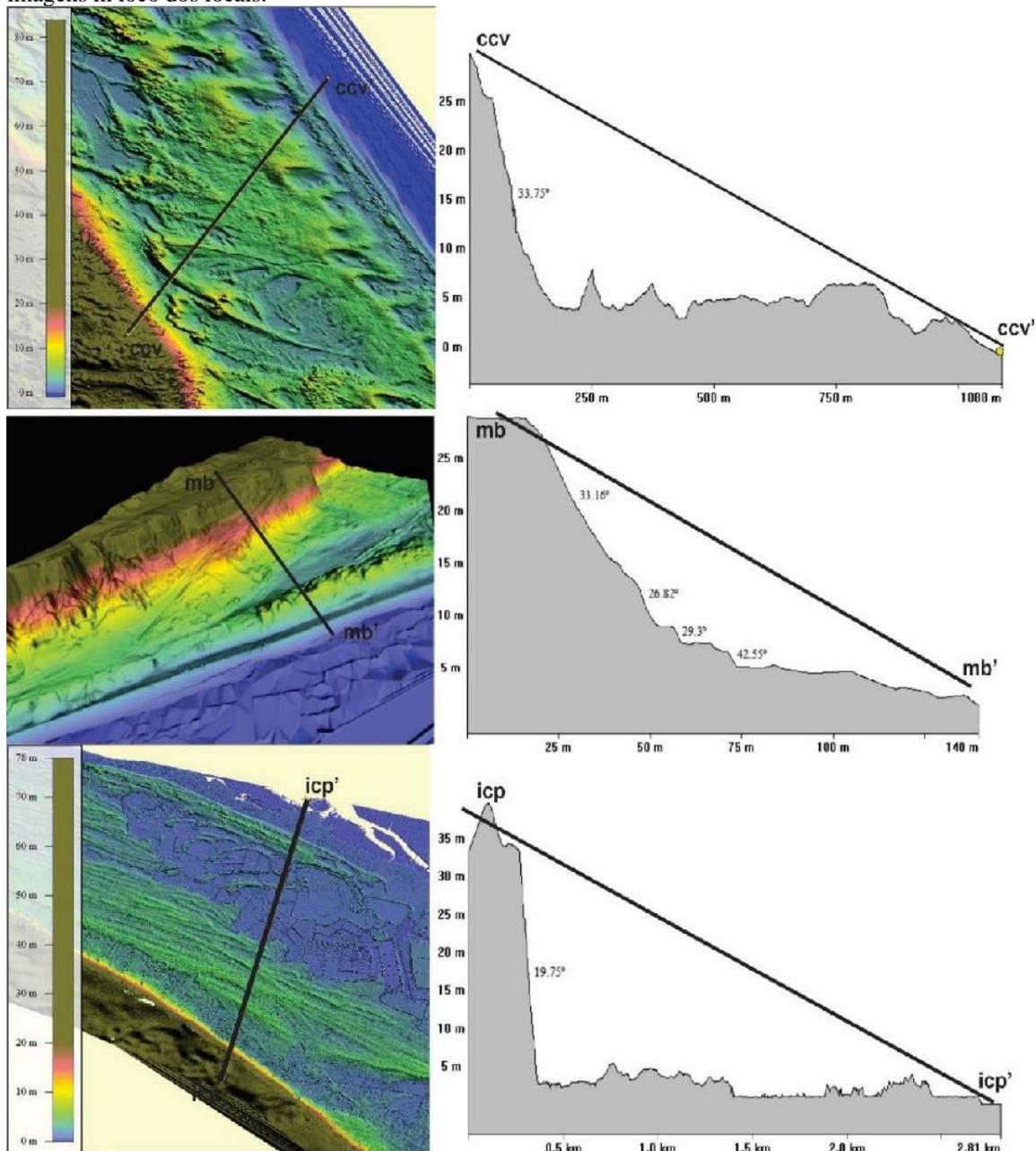
Apesar de possuir grande elevação, o perfil dessas paleofalésias é intermediário, com declividade máxima de 58.52° e declividade média de 47.14° (Fig. 13).

A segunda maior linha de paleofalésias está no município de Cascavel, na praia de Barra Nova, e possui extensão de 3.8 km. A altura máxima da escarpa dessas paleofalésias é de 27.63 metros e média de 21.13m, estando a uma distância média de 1288 m da linha de costa atual (Figura 13).

Além disso, a declividade máxima em um ponto da escarpa pode chegar a 70.54° e a declividade média de 33.75°, indicando a suavização do perfil desde a sua inatividade, com alto índice de erosão subaérea somando 168 voçorocas na linha de paleofalésias.

As falésias de Barra Nova possuem a mesma litologia das paleofalésias nas praias de Morro Branco e do patamar superior das falésias de Icapuí, em relação às falésias ativas, possuem a mesma litologia das ativas em Aracati e das arenosas do Fortim.

Figura 13- Perfis topográficos nas paleofalésias no litoral leste do Ceará, nos municípios de Cascavel (ccv), Beberibe (mb) e Icapuí (icp), utilizando imagens do Lidar e indicando o início e final do perfil topográfico. Detalhando a escarpa das falésias inativas que estão a distâncias de um quilômetro da linha de costa e imagens in loco dos locais.



Fonte: Silva et al., 2020.

Por último, a linha de paleofalésias no município de Beberibe possui a menor extensão com 1.5 km e localizada em duas praias, são elas Morro Branco e Uruaú. A altura máxima das escarpas é de 15.73 m e a altura média é de 14.64 m (Figura 13).

Em relação à declividade, a máxima alcança 64° e a média 56.04° e a distância delas para a linha de costa alcança uma máxima de 166 m e possui média de 74.95 m, apresentando dunas em processo de fixação entre as paleofalésias e a linha de costa. Assim como as falésias da ativas da região, seu perfil é erodido diferencialmente, pois seu topo é altamente friável, sedimentos do Grupo Barreiras e sua escarpa e boa parte do topo é protegido por vegetação

5.3.3 Voçorocas

Voçoroca é a remoção do solo por canais através da acumulação de escoamento superficial, são geralmente definidos pela sua profundidade de canal que pode variar de 0.5 a 30 m (*Soil Science Society of America*, 2001).

Essa feição morfológica é comum nas falésias do Ceará, devido ao seu caráter friável e arenoso. Com isso, foram contabilizadas um total de 2430 voçorocas no litoral leste do Ceará, sendo 1997 em falésias ativas e 433 em paleofalésias.

Das falésias ativas, o município de Aracati possui cerca de 60% do total de voçorocas (1187 voçorocas), entre elas a praia de Canoa Quebrada se destaca por apresentar a segunda maior voçoroca das falésias do Ceará.

Esta possui formato retilíneo com extensão de 123 metros e largura máxima do canal de 6.12 m, com largura média de 3.9 m e declividade de 9°, permitindo o fácil acesso de moradores e turistas com baixa mobilidade para alcançar a faixa de praia (Figura 14).

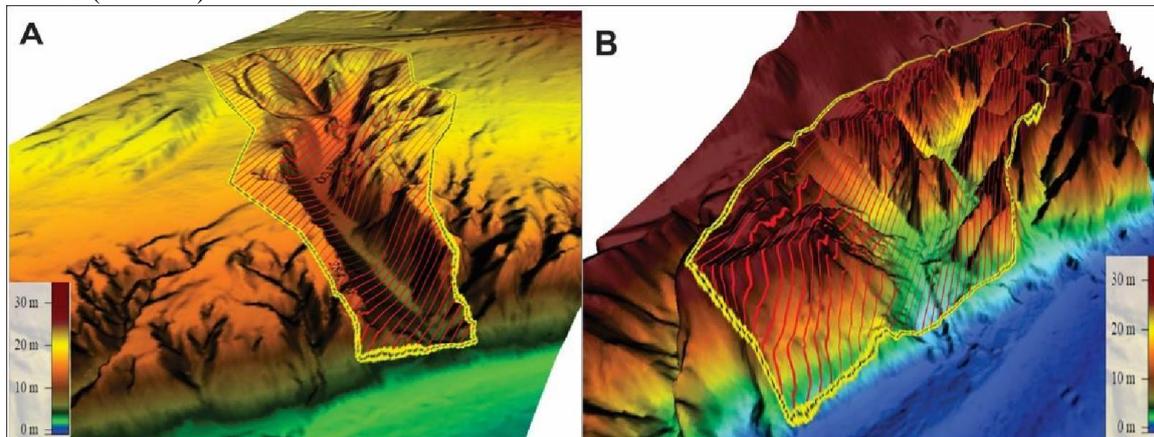
A área da voçoroca é de 2.67 km² em um perímetro de 368 metros, com isso, o volume de sedimentos transportados desta voçoroca para a zona costeira é de 162.28390 m³, e o volume de sedimentos restantes na área é de 349.35993 m³. Apesar de possuir um canal largo, essa voçoroca apresenta apenas 8 ravinas e sulcos pouco desenvolvidos (Figura 14A).

A declividade das paredes do canal é distinta, com a margem direita possuindo uma escarpa com declividade máxima de 73.2° e sedimentos inconsolidados acumulando na base da parede do canal com declividade média de 36.54°. A margem esquerda é escarpada com declividade máxima de 71° e não possui sedimentos inconsolidados em

sua base, além disso, apresenta resquícios de erosão eólica em sua escarpa, que deixa a falésia com aspecto de ruínas.

A maior voçoroca em falésias ativas, que se destaca no litoral leste do Estado, está localizada na praia de Morro branco (Beberibe), pois possui a maior voçoroca do litoral leste do Ceará, com área de 10.5 km² e perímetro de 536 m, com isso o volume de sedimentos removidos dessa voçoroca é de 886.953 m³ e o volume restante de sedimentos desta área é de 2295.620m³.

Figura 14- Área das voçorocas em imagem lidar nas praias de A- Canoa Quebrada (Aracati) e B- Morro Branco (Beberibe).



Fonte: Silva et al., 2020.

A extensão do canal é de 201 metros e a largura máxima alcança 14.37 m, com largura média de 8.63 m. Sua morfologia é rica em reentrâncias, com um formato parecido como uma bacia hidrográfica (Figura 5B), permitindo criar trilhas por dentro do canal da voçoroca e um parque para atividades turísticas.

Nesta também é possível verificar a declividade de sua escarpa máxima de 71° e média de 43.38°. Seu canal é mais suave, possuindo uma declividade média de 6.39°.

Outra morfologia composta por áreas de voçorocas perpendiculares a linha de costa bem definidas, com o topo erodido verticalmente destacando o ravinamento remontante, de coloração sedimentar da camada superior branco e inferior alaranjada localizado na praia de Lagoa do Mato (Aracati). Essa erosão está presente em 4.46 km da linha de falésias ativas do município, composta por um topo recuado e voçorocas em formato parecido com o de uma bacia hidrográfica, ou raízes ramificadas, em média de 103 metros de comprimento e canal largo com média de 19.31 m de largura, declividade da escarpa dessas falésias varia de 18.62° na base a 51.34° na área mais escarpada.

5.4 Discussões

A localização das falésias (ativas e paleofalésias) também foi mapeado por Moraes et al, (2018), porém sem a quantificação destas no litoral e sem as feições morfológicas derivadas destas falésias. Ximenes Neto et al., (2019) mapearam as paleofalésias no Ceará, identificando 15 linhas de paleofalésias, sendo 5 delas no litoral leste, totalizando 89,7 km dos 573 km de linha de costa do Estado, sendo o litoral entre Fortaleza-Icapuí com (32,4 km), 6.64 km a menos do que as paleofalésias que foram mapeadas no estudo. Os dois trabalhos não identificaram as paleofalésias do litoral de Uruaú (Beberibe).

As falésias são associadas à fatores eustáticos e/ou tectônicos (BIRD, 2008), no qual as ativas podem apresentar plataformas de abrasão na faixa praial adjacente às falésias, as paleofalésias apresentam longas distâncias para a linha de costa atual com várias cristas praias neste percurso.

As plataformas de abrasão são formadas no processo de recuo das falésias e ficam dispostas na faixa praial, abaixo da linha de preamar, alguns alinhamentos rochosos descontínuos que compõem plataformas de abrasão e/ou rochas de praia (*beach rocks*). Elas indicam um nível do mar mais baixo que o atual, no qual foi ocorrendo o recuo da falésia e deixando uma plataforma exposta conectada diretamente com a litologia dos materiais mais resistentes, com é o caso da Formação Tibau, presente na área basal das falésias ativas de Beberibe e Fortim, e da Formação Jandaíra em Icapuí.

O material da Formação Tibau no litoral leste do Ceará é constituído por arenitos com matriz silto-arenosa de cores cinzentas e cimento calcífero (MORAIS et al., 2006) presentes nos municípios de Beberibe (praias de Morro Branco e Praia das Fontes), Fortim (praia de Pontal de Maceió), Aracati e Icapuí. Vale ressaltar que a Formação Tibau e a Formação Jandaíra estão dentro do Grupo Apodi juntamente com a Formação Açú, que afloram na região litorânea emersa na forma de falésias e pontais rochosos que interagem com os processos hidrodinâmicos na elaboração da zona costeira (LIMA et al., 2000).

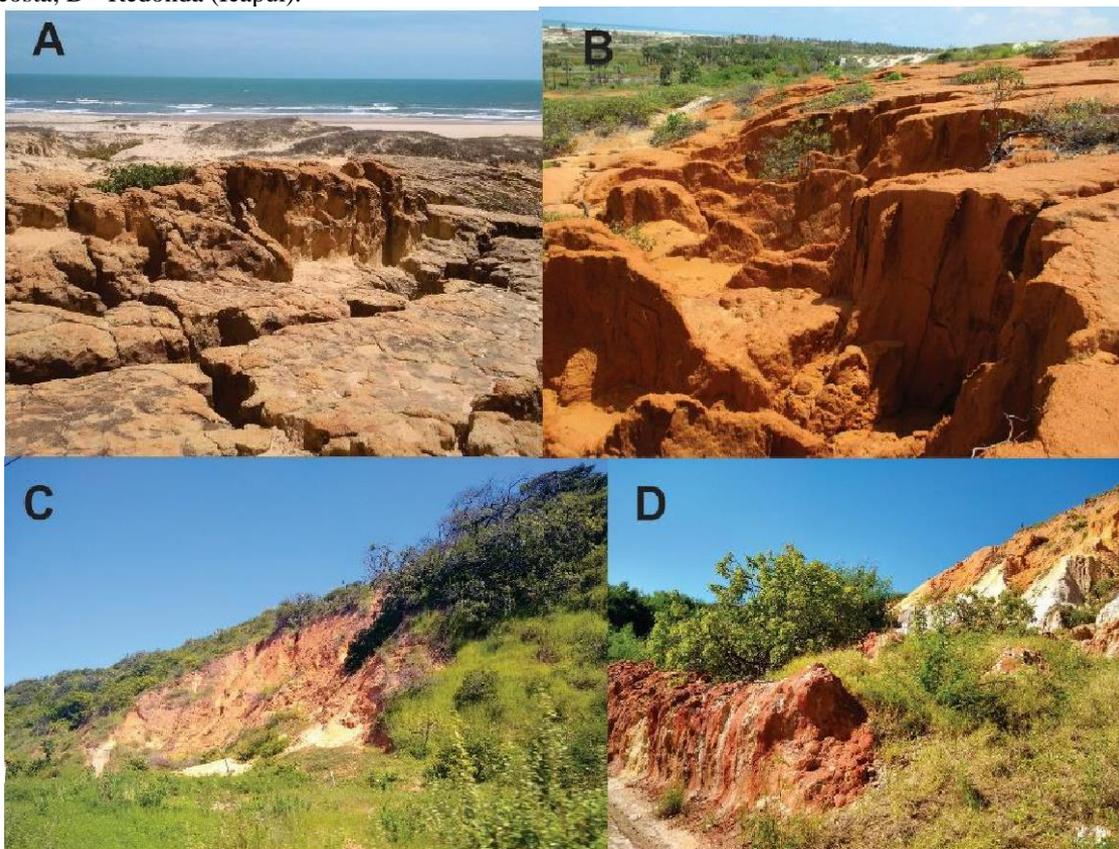
O perfil das falésias ativas é modelado constantemente por ações marinhas em sua base e fatores climáticos no topo, com ações sazonais de solapamento, que é a retirada de sedimentos da base, e desmoronamento, que é o desprendimento dos sedimentos superiores. Essas ações suavizam ou escarpam o perfil destas, e segundo Davidson-Arnott (2010), falésias que possuem escarpas até 40° são chamadas de *bluffs* e escarpas com inclinação > 40° são chamadas de *cliffs*. Com isso, a escarpa das falésias ativas está

classificada como *cliffs*, e no setor mais basal onde encontra-se cicatrizes de desmoronamento o perfil é suavizado classificando como *Bluff*.

As paleofalésias estão dentro da classificação de *bluffs* devido a maior erosão aérea e subaérea, presença de vegetação. Essa classificação pode ser atrelada ao fato que *cliffs* por serem mais íngremes em falésias ativas apresentam maiores riscos e vulnerabilidade a desmoronamentos e quedas e blocos. As *bluffs* possuem um perfil mais estável, não apresentando riscos causados por erosão marinha, assim, as *bluffs* podem ter evoluído a partir de uma *cliff*.

As paleofalésias do município de Beberibe possuem pouca extensão e escarpas características de falésias ativas, isso porque são possivelmente as paleofalésias mais recentes (Figura 15).

Figura 15- Imagens das paleofalésias no litoral leste do Ceará, nas praias de A- Uruaú (Beberibe); B- Barra Nova (cascavel); C- na região de Requenguela (Icapuí), onde estão as falésias mais distantes da linha de costa; D - Redonda (Icapuí).



Fonte: Silva et al., 2020.

As paleofalésias do litoral leste possuem declividade de escarpas em torno de 40°, caracterizadas como *bluffs*. Além disso, estas falésias estão diretamente relacionadas com a variação do nível do mar durante o Quaternário, pois são antigas linhas de costas que

estão em um nível mais do que o nível do mar atual, podendo ser utilizadas como marcadores de flutuação (Suguio, 1985; Ealey and James, 2001; Bird, 2008). Na costa do Ceará, Morais (1998) associa a presença de paleofalésias aos máximos transgressivos do Sangamoniano (~125.000 anos A.P) e Holoceno Médio (~5.000 anos A.P). Posteriormente a estes níveis altos, o nível do mar regrediu e formou terraços marinhos, evidenciados em cristas praias progradantes.

Seguindo em relação ao perfil das falésias, Emery e Kuhn (1980) afirmam que quanto maior o grau de inclinação da escarpa da falésia maior é a ação marinha comparada com a ação subaérea, e quando o perfil está suavizado isso indica erosão subaérea é atuante ou maior que a marinha, comprovando isso nas paleofalésias de Icapuí que possuem inclinação da escarpa compatível com *bluffs*. A vegetação em falésias costeiras sedimentares está relacionada à estabilização de taludes, ocorrendo principalmente no topo das falésias por vegetação arbustiva de pequeno porte e rasteira, que protegem contra a perda sedimentar e minimizam o escoamento superficial. Nas falésias inativas de Icapuí apresenta vegetação mais desenvolvida com porte arbustivo, indicando um período em que a erosão subaérea ocorreu por um período maior, comparado às paleofalésias de Beberibe.

A erosão de falésias ativas por ações marinhas e climáticas é descrita em um estudo global chamado de GlobR2C2 (PREMAILLON et al. 2018), com 1530 falésias estudadas e mais de 1680 taxas de erosão estimadas, afirmando que a taxa de erosão média para rochas consolidadas é de 2.9 cm/ano, para rochas médias de 10 cm/ano e rochas fracas de 23 cm/ano. De acordo com sua litologia descrita por Silva (2017), Morais et al., (2018), as falésias mapeadas do litoral leste do Ceará podem ser consideradas entre médias e fracas. Mushkin et al. (2019) obtiveram resultados um pouco menores em um estudo de taxas de recuo recentes (anual-decadal) versus taxas de recuo antigas (centenário-milenar), variando entre 3 cm/ano e 9 cm/ano. Assim, as falésias do litoral leste possuem uma taxa de recuo variando possivelmente entre 9 cm/ano e 23 cm/ano.

As falésias ativas do município de Fortim possuem dupla litologia, uma de composição arenítica fortemente cimentada com 3.37 km de extensão, localizado na praia de Pontal de Maceió, na desembocadura esquerda do rio Jaguaribe. Apresenta baixa altura devido sua constituição fortemente cimentada compacta, representante de um pequeno afloramento da Formação Tibau na região, com presença de solapamentos causados por ação marinha, formando pequenas cavernas. Além disso, apresenta uma plataforma e abrasão na praia adjacente como resquícios de erosão, descrito primeiramente como

sendo formado por *beach rocks* (SMITH & MORAIS, 1984) e atualmente pesquisadores afirmam que essas falésias foram moldadas em sedimentos arenosos fortemente cimentados da Formação Tibau (LEITE et al., 2016) em função do arqueamento crustal decorrente da ação dos sistemas de falhas presentes no Graben Jacaúna (CASTELO BRANCO, 2003).

Além dessa composição arenítica fortemente cimentada, podemos observar nas imagens ortofotos 1.07 km de falésias arenosas friáveis, classificadas dentro do Grupo Barreiras como Depósitos "Pós-Barreiras", assim como as falésias dos municípios de Beberibe, Aracati e Icapuí, formada por forçante fluvial. Carvalho Neta (2007) identificou paleofalésias na costa de Fortim, situado na margem esquerda do Rio Jaguaribe, porém estas se apresentam como pequenos afloramentos, espaçados, de poucos metros de altura, não sendo perceptível no mapeamento. Além disso, as falésias regidas por forçantes fluviais não entraram no mapeamento, somente as falésias que possuem ou não influência marinha.

A altura das falésias ativas na praia de Icapuí apresentaram os maiores valores, mesmo assim está bem abaixo dos 70 metros indicado por Meireles (2014) na região, e menos que a metade das falésias no litoral da Califórnia, na costa oeste dos Estados Unidos, possuem falésias arenosas ativas que podem alcançar até 100 metros de altura (STERRETT, 2002). Apesar desse valor para as falésias de Icapuí, no litoral do Rio Grande do Norte (estado vizinho a leste) as falésias na região da Serra do Mel alcançam 200 m (MAIA e BEZERRA, 2014). Indicando que as falésias vão aumentando de altitude no sentido oeste – leste, possivelmente por influências tectônicas da região (SOUSA, 2002; SOUZA et al., 2008).

Os patamares escalonados na costa de Icapuí (Figura 16), de acordo com Meireles (2014), são vinculados aos processos erosivos diferenciados devido às diferenças sedimentológicas. A fácies arenosa superior é mais suscetível à erosão subaérea pluvial e a camada abaixo, mais resistente é mais escarpada devido ao ataque direto das ondas.

Essas características refletem diferenças na suscetibilidade à erosão entre camadas, truncam as camadas ou grãos estruturais, ou são uma combinação das duas. O primeiro pode ser atribuído a processos gerais de intemperismo, como aborda Meireles (2014). No entanto, o truncamento (especialmente se horizontal) deve ser atribuído a processos de "corte" mais agressivos, como uma forçante neotectônica da região.

De acordo com estudos de neotectônica e falhas interpretadas por sísmica de reflexão no município de Icapuí (SOUZA et al., 2008; MAIA, 2012), justifica as maiores

alturas encontradas em falésias no Ceará neste local, e os patamares escalonados distantes em torno de 44m entre os patamares e 156 m da linha de costa. Não excluindo a erosão em camadas apresentada por Meireles (2014), mas um compilado das duas.

Figura 16- Patamar escalonado na praia de Redonda (Icapuí), mostrando a erosão diferenciada das camadas superior e inferior, as voçorocas no topo da camada superior de perfil mais suavizado e solapamento na base da falésia ativa da camada inferior de perfil mais escarpado.



Fonte: Silva et al., 2020.

As feições morfológicas presentes nas falésias como voçorocas bem desenvolvidas, erosão remontante e patamar escalonado são desenvolvidas nessa região devido às características litoestratigráficas de sedimentos semiconsolidados, friável, areníticos, fracamente cimentados (MORAIS et al., 2006). Os processos de voçorocamentos são desencadeados por sistemas inadequados de cultivo e irrigação, sobre pastoreio, trilhas de transporte de madeira, construção de estradas e urbanização (VALENTIN et al., 2005). Pinheiro et al (2009) realizou num estudo em campo nesta voçoroca e obteve resultados parecidos ao apresentado pelas imagens do Lidar, e afirma que o solo se encontra em estágio avançado de compactação, o que além de contribuir no aumento do escoamento superficial dificulta o processo de recarga do aquífero.

A quantidade de voçorocas encontradas em falésias ativas foi maior que as encontradas em paleofalésias, apenas em Icapuí a quantidade é similar entre as classificações das escarpas. Apesar de as paleofalésias serem modeladas majoritariamente por ações subaéreas (chuva, vento, temperatura, escoamento), elas apresentaram baixa

quantidade de voçorocas, e estas são pequenas e pouco desenvolvidas. Isso ocorre porque as paleofalésias possuem uma alta cobertura vegetal em seu topo e em sua escarpa, motivo pelo qual imagens de LiDAR são essenciais para o mapeamento de paleofalésias.

A formação e erosão de voçorocas é importante para o aporte e balanço sedimentar das praias no litoral cearense, assim como dunas e estuários, as falésias perdem sedimentos para equilibrar a erosão e progradação da linha de costa. Na costa de Oceanside, na Califórnia, Estados Unidos, as voçorocas contribuem com 44.7% dos sedimentos que chegam à praia (STERRETT, 2002). Na ilha de Santa Cruz também na Califórnia entre 32-78% de volume de sedimentos erodidos no leque aluvial, em volume o resultado foi de 21.854 m³ de material perdido em uma área de 25.323 m² ou 0.86 m³m⁻² (PERROY et al. 2010).

A evolução da área das voçorocas em relação à ocupação no topo das falésias de Canoa Quebrada (Aracati) feita por Silva (2017) no período de 2004 a 2016 mostrou uma redução em 11% sua área de voçorocas, devido ao aumento da ocupação urbana que foi de 85% no mesmo período, que cresceu no sentido continente-praia e paralelo à linha de costa, em alguns pontos descaracterizando as falésias para construção de casas e barracas de praia. É possível que eventos climáticos esporádicos causem aberturas de voçorocas e grandes perdas de volume de sedimento. Na maior, a voçoroca de Canoa Quebrada foi formada por um evento climático de alta energia em abril/2009, com chuvas torrenciais em curto período, somado ao escoamento superficial.

O volume sedimentar que as voçorocas das falésias arenosas transportam para as praias adjacentes é três vezes a 16 vezes maior que o volume de sedimentos que são transportados pelas correntes litorâneas. Segundo o estudo feito por Maia (1998) sobre cálculos para o volume de sedimentos transportados pela corrente de deriva litorânea no litoral de Fortaleza, a partir da Praia do Futuro, determinou que são carregados em média 855.000 m³/ano de areias e, pelo cálculo através da batimetria, com um valor semelhante, com 881.000 m³/ano. Deste modo, Maia faz uma média e estima que o volume de sedimentos transportados longitudinalmente pela corrente de deriva litorânea é de aproximadamente 860.000 m³ por ano.

A erosão remontante indica um alto escoamento superficial para as bordas da falésia, evidenciando os riscos subaéreos da região, que apresenta em alguns pontos uma zona urbana próxima a ruptura do relevo. Smith & Morais (1984) descreveram uma parte das falésias dessa região situadas na praia de Marjolândia, a leste da desembocadura do rio Jaguaribe, como uma falésia bem baixa parcialmente cortada por ravinas com todos

os depósitos sendo rapidamente erodidos. Confirmando uma área vulnerável às ocupações e com alto índice de mobilidade em toda a costa de falésias do município de Aracati.

As áreas de falésias devem ser rigorosamente preservadas pela sua importância no mecanismo de evolução da faixa costeira bem como de sua vulnerabilidade à ocupação. As falésias ativas nos municípios de Beberibe e Aracati são destaques no litoral leste do Ceará devido ao seu alto potencial turístico e especulação imobiliária, com as praias de Morro Branco e Canoa Quebrada.

O principal problema que se interpõe ao uso e ocupação dessas feições reside em suas condições ecodinâmicas instáveis e em sua alta vulnerabilidade. Os riscos e vulnerabilidade dessas feições em constante modelagem são descritos por Boruff et al (2005); Moraes et. al. (2006); Del Río & García (2009).

5.5 Conclusões

As falésias arenosas friáveis e resistentes do Ceará estão associadas principalmente aos depósitos da Formação Barreiras e Formação Tibau, que se concentram no litoral leste, indicando o início da Bacia Potiguar. As paleofalésias mapeadas indicam a variação do nível do mar na região em três localidades, como verificado um recuo variável de 1200 m (Cascavel) a 3200 m (Icapuí).

Todas as falésias mapeadas (ativas e inativas) demonstram uma erosão subárea atuante, representada por voçorocas que variam seu tamanho de poucos metros até 201 metros, que estão presentes em todas as falésias que não estão cobertas por vegetação. As duas maiores voçorocas estão em áreas urbanizadas com escoamento superficial atuante, porém as duas possuem formas distintas. Enquanto uma na praia de Morro Branco possui voçorocas e ravinas bordejantes, parecido com afluentes de um rio, possui uma forma de escoamento mais natural. A outra, está localizada na praia de Canoa Quebrada é mais larga e retilínea, indicando o ponto final específico no qual o escoamento superficial da urbanização alcança.

Em um total de 73 quilômetros de linha de falésias ativas e inativas, apenas um trecho de três quilômetros possui uma área de proteção ambiental integral atuando, impedindo novas ocupações irregulares na área. Essa região é conhecida como Parque Monumental das Falésias de Morro Branco, gerido por um órgão ambiental federal

ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) em parceria com órgão ambiental estadual (SEMACE – Superintendência Estadual de Meio Ambiente) e órgão ambiental municipal (SEPLAN – Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente). Outras duas unidades de conservação nas falésias são a Área de Proteção Ambiental da Praia de Ponta Grossa e a Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada. A última incorpora as falésias arenosas, porém sua eficácia não é efetiva, devido ao alto nível de ocupações no topo e na base da falésia e suas características geológicas erosivas da Formação Barreiras Indiviso.

6.2. LITOESTRATIGRAFIA E EVOLUÇÃO DAS FALÉSIAS NO NORDESTE BRASILEIRO.

RESUMO

Falésias são formas geomorfológicas associadas a depósitos sedimentares, possuindo um topo aplainado e vertentes escarpadas formadas por ações abrasivas das ondas e marés. Grande parte das falésias brasileiras estão associadas aos depósitos da Formação Barreiras de origem Miocênica, entre 17,5 e 23,75 Ma, e ocorrem ao longo do litoral e se estendem desde a região amazônica até o estado do Rio de Janeiro. No Ceará (Nordeste brasileiro), estas apresentam mais de uma composição, sendo a parte superior de arenitos inconsolidados discrepantes dos sedimentos da Formação Barreiras. O objetivo do capítulo é caracterizar a sedimentologia das escarpas das falésias e discutir a evolução dos sedimentos na zona costeira do litoral cearense. Para isso, foram comparadas as composições granulométricas, morfológicas, geoquímica e cronológica de grãos de quartzo desses depósitos através de amostras sedimentológicas coletadas nas escarpas das falésias cearenses dos depósitos do "Pós-Barreiras" e da Formação Barreiras. Foram usadas metodologias de peneiramento seco e húmido, observações microscópicas, fluorescência de Raios-X (XRF) e a técnica de luminescência opticamente estimulada (LOE). Os dados sedimentológicos comprovam que a Formação Barreiras é classificada como areno-argilosa (60% de areia e 40% de silte/argila) pobremente selecionada, platicúrtica e com assimetria positiva, já os depósitos "Pós-Barreiras" como predominantemente arenosos (90% de areia e 10% de silte/argila) pobremente selecionado, leptocúrtica e com assimetria positiva. A deposição e origem desse material é de origem terrígena devido a sua composição geoquímica (72% de Si e 13% de Al) e granulometria associada a transporte fluvial. A seção estratigráfica das falésias estudadas mostra três conjuntos distintos representados do topo para a base pelas Formações Barreiras, Tibau e depósitos do "Pós-Barreiras". Esta última se estende por todo litoral leste cearense no qual foram depositadas entre 49.000 ± 3.260 e 95.850 ± 5.500 anos, ocorrendo no Pleistoceno Superior. Com a descoberta da origem do material, às falésias cearenses apresentam um maior risco e suscetibilidade e erodibilidade quando apresentam uma escarpa formada pelos depósitos do "Pós-Barreiras" do que quando a Formação Barreiras está presente. O estudo possui novos dados para a comunidade local, científica e órgãos governamentais competentes para a gestão e criação de áreas de proteção ambiental com embasamento científico, preservando essa feição geomorfológica recente na escala geológica. Mantendo, assim, a paisagem, a forma, o turismo e controlando os riscos de desmoronamentos locais. O capítulo está em produção e finalização para ser publicado no *Journal of South American Earth Science* ou no *Sedimentary Geology*, por isso se encontra no formato de artigo científico.

Palavras-chave: LOE; Estratigrafia; Falésias; Formação Barreiras.

6.1 Introdução

As falésias são feições geomorfológicas que possuem um topo aplainado e vertentes escarpadas, tendo sua formação variando em idade, desde o pré-cambriano (mais de 560 milhões de anos) no norte do Canadá (CLAUNIDO-SALES, 2019) até a deriva glacial do Pleistoceno (depositada apenas dezenas de milhares de anos atrás) na costa polonesa no sul do mar Báltico (RAUKAS e GAIGALAS, 2018). A maioria das falésias costeiras atingiu sua forma atual durante o Holoceno, particularmente durante os últimos 6.000 anos, quando o mar se manteve próximo ou no nível atual como uma sequela da transgressão marinha mundial do Quaternário Tardio (BIRD, 2016).

Atualmente estão presentes em 52% da linha costeira mundial (YOUNG e CARILLI, 2019), e sua geomorfologia é fortemente influenciada pela geologia, particularmente pela estrutura e litologia das formações rochosas aflorantes, produzidos pelo soerguimento do terreno e rebaixamento do nível do mar ao longo do tempo geológico, mas algumas foram modificadas por soerguimento tectônico ou flutuações do nível do mar nesse período.

As falésias mais simples encontram-se onde a erosão marinha atacou as margens de uma massa de terra estável, removendo uma cunha de material para formar um declive acentuado que pode ser vertical ou mesmo saliente, encimado por uma plataforma costeira inclinada para o mar que se estende desde a base da falésia abaixo do nível da maré baixa (BIRD, 2016).

Os efeitos da erosão marinha dependem da natureza e resistência das formações rochosas encontradas. A sua litologia varia desde quartzitos muito duros, formações ígneas como granitos e rochas metamórficas endurecidas como *greenstones*, passando por ardósias moderadamente duras até arenitos e calcários macios como giz e *mudrocks* fracos como xistos e argilas. Dependendo dessa composição, a taxa média de erosão das falésias varia de 2,9 cm por ano para rochas duras, 10 cm por ano para rochas médias e 23 cm por ano para rochas fracas (PRÉMAILLON et al., 2018).

Porém, os estudos que analisam as falésias mundiais não abordam as falésias brasileiras da Formação Barreiras, devido à escassez de trabalhos publicados em revistas de amplo impacto no idioma inglês. Por isso, o capítulo possui o objetivo de caracterizar as escarpas sedimentares das falésias do litoral leste do Ceará (Nordeste do Brasil), identificando o alcance desse depósito sedimentar, comparar com falésias e depósitos sedimentares de outros estados do norte e nordeste do Brasil, discutir a evolução dos

sedimentos destes depósitos na zona costeira do litoral cearense e auxiliar com dados para os cálculos de taxas de erosão, suscetibilidade e vulnerabilidade. Visto que muitas dessas falésias possuem um alto potencial turístico por sua possibilidade de vista panorâmica, essas formações naturais atraem a instalação de grandes complexos hoteleiros, condomínios e turismo predatório que acabam por comprometer sua existência e as transformam em áreas de risco de desmoronamento (ASSAD, 2010).

Estudos similares foram realizados na costa norte e nordeste do Brasil, como no Pará (ROSSETTI et al., 2001; TATUMI, et al., 2008), Maranhão (ROSSETTI et al., 2013), Rio Grande do Norte (FREIRE, 2019; MORAIS et al, 2020) Pernambuco (SOUZA et al., 2015) e Bahia (SOUZA et al., 2016).

O capítulo a seguir possui uma abordagem geológica e sedimentológica das falésias, apresentando novos dados para a comunidade local, científica e órgãos governamentais competentes para a gestão e criação de áreas de proteção ambiental com embasamento científico, preservando essa feição geomorfológica recente na escala geológica. Mantendo, assim, a paisagem, a forma, o turismo e controlando os riscos de desmoronamentos locais.

6.1.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo situa-se no litoral leste do Ceará, Nordeste do Brasil, em uma área de 184.21 km representando 32.14% da costa do Estado (IPECE, 2013). Destas, 40% são compostas por falésias ativas e/ou paleofalésias, ou seja, 74.33 km de falésia no litoral, totalizando 36.7 km de falésias ativas e 39.14 km de falésias paleofalésias (SILVA et al, 2020).

As falésias se estendem na direção oriental pelo litoral do Rio Grande do Norte (até o município de Touros), que segundo Moraes et al., (2016) são predominantemente arenosas esculpidas na Formação Barreiras. Os depósitos da Formação Barreiras são dominantes nas falésias brasileiras (SUNAMURA, 1992), e ocorrem ao longo do litoral e se estendem desde a região Amazônica, região costeira Norte e Nordeste, até o Sudeste do país, no estado do Rio de Janeiro (NUNES et al. 2011).

Esta é descrita por Lima (2008) e Maia (2012) como de origem Miocênica com idade variando entre 16 e 27 Ma, Segundo Dominguez (2011), o Mioceno marca o início do mundo moderno, a partir dele a fisiografia do planeta Terra não teria sido muito

diferente da atual. Após o nível de mar alto do Mioceno médio, associado a deposição da Formação Barreiras, o nível eustático do mar desceu progressivamente em função do avanço dos lençóis de gelo principalmente no Hemisfério Norte (DOMINGUEZ, 2011).

A Formação Barreira consiste em uma cobertura sedimentar com camadas intercaladas de argilitos, siltitos e arenitos, com diferentes teores de silte e argila e arenitos conglomeráticos, além de ocorrer com frequência a presença de camadas endurecidas com cimentação ferruginosas de tonalidades com coloração viva que variam desde vermelhas, amarelas e até brancas (SOUSA, 2018).

O pacote sedimentar observado nas falésias do litoral leste do Ceará até a região do Icapuí, apresenta características levemente distintas da Formação Barreiras, onde, na praia de Icapuí é possível encontrar os dois pacotes sedimentares em uma mesma escarpa de falésia. Claramente eles possuem características e erodibilidades distintas, sendo o segundo, mais arenoso destaque em notícias em jornais e motivo de preocupação para os usuários e turistas (G1 CE, 2022).

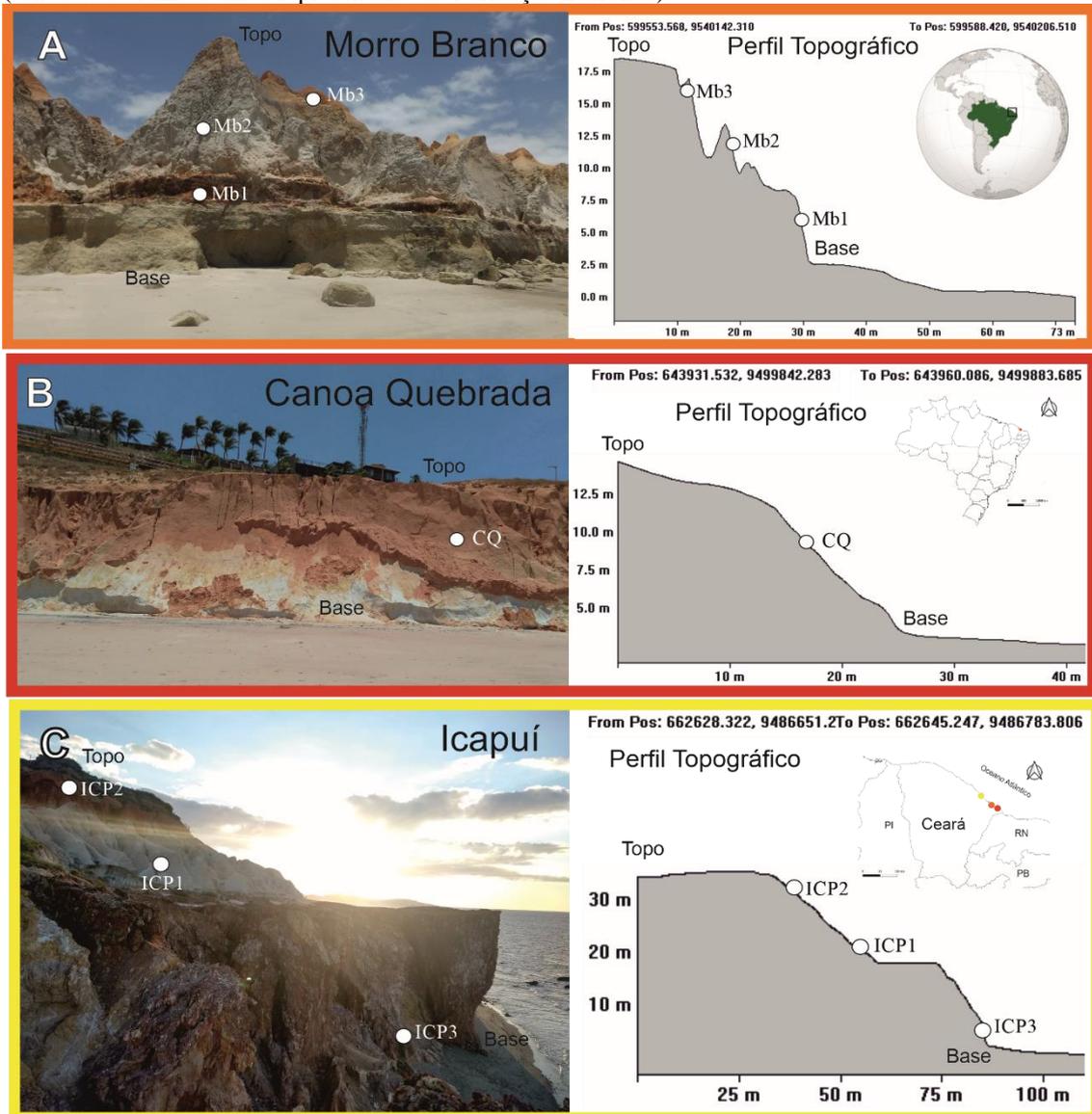
Com o passar do tempo, os pesquisadores na área de Geologia marinha estudaram os depósitos da Formação Barreiras e encontraram algumas discordâncias em relação à sua deposição. O termo "Pós-Barreiras", foi utilizado primeiramente por Rossetti et al., (2001) para identificar depósitos sedimentares com origem após a deposição da Formação Barreiras. Esses sedimentos "Pós-Barreiras" representam uma camada litoestratigráfica com sedimentos siliciclásticos arredondados, além de arenitos e argilitos ferruginosos de idade Pliocênica identificados no Norte do Brasil. Essa deposição "Pós-Barreiras" é descrita como Formação Macaíba por Mabesoone et al., (1971), que é a descrição que mais se aproxima dos sedimentos das falésias do litoral leste do Ceará.

Os sedimentos que se depositaram sobre a Formação Barreiras, mais do que representativos de um evento de sedimentação único e contínuo, podem incorporar uma complexidade de eventos deposicionais (ROSSETTI et al., 2013). O estudo desses depósitos é de grande relevância para a reconstituição dos eventos de oscilação do nível do mar e da evolução climática e tectônica da costa brasileira no final do Quaternário, além de entender suas características, erodibilidade e comportamento mediante a eventos meteoceanográficos.

As falésias do litoral leste do Ceará (Nordeste do Brasil) apresentam características muito similares às descritas como Formação "Pós-Barreiras", por isso, a hipótese do trabalho é que essas falésias possuem outra Formação, mais erosiva, recente, que causa maior suscetibilidade e risco aos usuários. Com isso, o estudo é focado em três

praias principais no litoral leste do Ceará: Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí (Figura 17).

Figura 17- Localização das oito amostras sedimentares dispostas na linha de costa da praia de A- Morro Branco com a localização das amostras Mb1, Mb2 e Mb3; B- Canoa Quebrada com a localização da amostra CQ e C- Icapuí com a escarpa da falésia localizando onde foram coletadas as amostras ICP1, ICP2 e ICP3 (sendo esta última a única representante da Formação Barreiras).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale destacar a presença da Formação Tibau de forma pontual nas praias de Morro Branco e seus arredores. As falésias ativas, no litoral de Beberibe, são descritas como Formações Barreiras no topo e Tibau na base, com afloramentos de plataformas de abrasão na antepraia (MORAIS et al, 2018).

No ponto de encontro entre as duas formações nas praias de Morro Branco e Praia das Fontes (Município de Beberibe) há a presença de fontes d'água na escarpa

(GONÇALVES JÚNIOR, et al., 2009). De acordo com Pinheiro (2003), devido à sua porosidade, as falésias do tipo semiconsolidadas podem armazenar temporariamente água da chuva ou de escoamento superficial. E posteriormente, abrir fissuras em sua escarpa formando exultórios e bicas na parte mais íngreme de sua morfologia, como por exemplo ocorrem nas falésias da praia de Morro Branco e praia das Fontes em Beberibe. Além disso, essas fissuras podem apresentar pontos erosivos subaéreos posteriores, que são acelerados pela ocupação urbana e impermeabilização do solo.

6.2 Materiais e métodos

6.2.1 Etapa em campo

Os campos foram realizados nos dias 24 e 25 de setembro de 2018 na baixa mar das marés de sizígia, para identificação e coleta de sedimentos superficiais, geotécnicos e estratigráficos na escarpa das falésias nas praias de Morro Branco, Canoa Quebrada e Peroba (Icapuí). A estratigrafia da sucessão sedimentar foi documentada usando técnicas sedimentológicas e estratigráficas convencionais com base na litologia, cor, composição, variações texturais e grau de intemperismo.

As sucessões dos depósitos sedimentares foram diferenciadas em unidades litoestratigráficas, segundo a metodologia de análise de solos de Santos et al. (2005). Foram analisadas as seguintes variáveis: Nível, situação, declive, cobertura vegetal, litologia, cor, cor de fundo, descrição dos mosqueados, textura, estrutura, porosidade, consistência, teor de umidade e grão de cimentação.

Para a análise granulométrica e textural foram coletadas 7 amostras superficiais distribuídas entre a base, escarpa e topo das falésias (Tabela 4). Foram coletadas amostras de acordo com a variação da coloração dos grãos nos seguintes setores da zona costeira: Praia de Morro Branco (3 amostras), Praia de Canoa Quebrada (1 amostra) e Praia da Peroba/Icapuí (3 amostras).

Das 7 amostras coletadas nos campos, 6 delas são representativas dos depósitos "Pós-Barreiras" (Tabela 4), são elas: MB1, MB2, e MB3, CQ, ICP1, ICP2. A amostra representante da Formação Barreiras foi coletada em Peroba (ICP3) na falésia ativa de caráter areno argiloso e moderadamente cimentado.

Tabela 4- Descrição das 22 amostras coletadas nas praias de Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí, o nome destinado a cada amostra, a descrição, formação geológica, caráter.

Localização	Amostra	Descrição	Depósito	Caráter
Morro Branco	MB1	Escarpa da falésia avermelhada	"Pós-Barreiras"	Arenoso
	MB2	Escarpa da falésia esbranquiçada	"Pós-Barreiras"	Arenoso
	MB3	Escarpa da falésia alaranjada	"Pós-Barreiras"	Arenoso
Canoa Quebrada	CQ	Escarpa da falésia alaranjado	"Pós-Barreiras"	Arenoso
Icapuí	ICP1	Patamar superior - branco	"Pós-Barreiras"	Arenoso
	ICP2	Patamar superior - laranja	"Pós-Barreiras"	Arenoso
	ICP 3	Falésia ativa	Formação Barreiras	Arenito argiloso

Fonte: Elaborado pelo autor.

As coletas para análise da técnica de LOE (Luminescência Opticamente Estimulada) ocorreram nos dias 20 e 21 de junho de 2019, um tubo de amostra para cada praia. Essa análise representa o momento na qual a amostra de sedimentos foi exposta, por um longo tempo, à luz solar pela última vez, sendo utilizada para datação de amostras afossilíferas. Durante a coleta, as amostras foram protegidas da luz solar, utilizando-se tubos de PVC de 5 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento (Fig. 18), a fim de evitar qualquer decaimento do sinal luminescente natural dos grãos que poderiam interferir na datação final.

As amostras foram coletadas na escarpa das falésias de Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí, sem a cicatriz de deslizamento recente, em uma altura de aproximadamente 1,5m. Para isso, foi necessário coletar as amostras dentro de uma voçoroca, e antes de inserir o tubo de PVC foi feita a raspagem de alguns centímetros na escarpa, depois para a entrada do tubo na escarpa da falésia foi martelado até entrada completa do tubo. Na praia de Peroba (Icapuí), a amostra foi coletada diretamente da escarpa, devido à localização dos sedimentos do "Pós-Barreiras" está em um patamar escalonado, assim, protegido da ação marinha, não apresentando desmoronamentos.

Após retirar o tubo das falésias, as extremidades são fechadas com duas tampas e seladas com fita silver tape, para melhor fixação e impedimento de luz solar, é identificado o topo e a base e escrito o nome da amostra (Fig.18).

Figura 18– Coleta de amostras para datação por LOE (Luminescência Opticamente Estimulada); A- escolha do local para a coleta onde não poderia ter cicatriz de desmoronamento; B- Raspagem superficial e inserção do tubo de PVC com ajuda de um martelo; C- retirada do tubo com cuidado para não contaminar a amostra; D- Amostras em tubos de PVC de 5 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento prontas para serem enviadas para a análise.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas praias de Morro Branco e Canoa Quebrado foi coletada amostra na escarpa das falésias onde não havia uma cicatriz de um deslizamento recente, em uma altura de aproximadamente 1,5m. Para isso, foi necessário coletar as amostras dentro de uma voçoroca, e antes de inserir o tubo de PVC foi feita a raspagem de alguns centímetros do local. Na praia de Peroba (Icapuí) a amostra foi coletada diretamente da escarpa, devido à localização dos sedimentos está em um patamar escalonado, assim, protegido da ação marinha, não apresentando desmoronamentos.

Após retirar o tubo das falésias, as extremidades são fechadas com duas tampas e seladas com fita silver tape, para melhor fixação e impedimento de luz solar, é identificado o topo e a base e escrito o nome da amostra (Fig.18-D). Posteriormente as amostras foram enviadas ao laboratório da empresa Datação, Comercio & Prestação de Serviços LTDA.

6.2.2 Etapa em Laboratório

Granulometria

O processamento das amostras começou com a análise granulométrica que foram coletadas em campo, condicionadas em sacos plásticos, etiquetadas e levadas ao Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO/UECE) para processamento adotando a metodologia de peneiramento pelo método gravimétrico, através do peneiramento mecânico e da pipetagem com a decantação de partículas no fluido conforme metodologia proposta por Suguio (1973).

Em laboratório, todas as amostras foram dispostas em cadinhos de vidro para serem encaminhadas à estufa a uma temperatura de 60 °C. Depois as amostras foram quarteadas e separadas 100 gramas com auxílio de uma balança digital. Com isso, inicia-se o primeiro procedimento de peneiramento, o úmido (Fig.19). Vale ressaltar que as amostras das falésias foram lavadas com um balde em baixo para análise posterior do teor de silte e argila.

Esse procedimento consiste na lavagem da amostra para a retirada de sedimentos mais finos (silte e argila) com uma peneira de malha de 0,062 mm sob água corrente, separando assim a amostra de fração mais grossa (areia fina, areia média, areia grossa e cascalho). Esse método serve também para a retirada de sais presentes na amostra, que impede a floculação do material. A fração mais grossa é levada novamente à estufa, a uma temperatura de 60 °C para a secagem durante um período de 72 horas.

A segunda etapa consiste no peneiramento seco, onde as amostras secas são dispostas em um conjunto de 11 peneiras com malhas de 4,00 mm, 2,83 mm, 2,00 mm, 1,410 mm, 1,00 mm, 0,710 mm, 0,500 mm, 0,354 mm, 0,250 mm, 0,177, 0,125 mm, 0,088 mm, e 0,062 segundo Wentworth (1922), respectivamente que são agitadas com ajuda do agitador Ro--Shaker, separando as frações de acordo com sua escala granulométrica determinada por cada malha das peneiras, posteriormente cada fração foi pesada e anotado em fichas (Fig.19).

A análise estatística para a obtenção do tamanho das partículas e a classificação textural foi realizada pelo *software* SAG desenvolvido pela Universidade Federal Fluminense. Foi utilizada a classificação de Folk e Ward (1957), que está relacionada aos padrões hidrodinâmicos e de sedimentação em um ambiente.

Figura 19- Análise das amostras coletadas nas falésias e analisadas em laboratório. Acondicionamento das amostras brutas em cadinhos; B- Lavagem das amostras para a separação dos sedimentos mais finos (silte e argila) com uma peneira de malha de 0,062 mm sob água corrente, vale ressaltar que foi colocado um balde no fundo da pia para análise de pipetagem. C- Peneiramento seco, para separar cada fração de acordo com a malha da peneira e posterior análise; D- A análise granulométrica de silte e argila por pipetagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pipetagem

A análise granulométrica por pipetagem tem por objetivo classificar os diferentes tamanhos de partículas menores que 0,062 mm (silte e argila), baseando-se no seu tempo de decantação em meio fluido conforme metodologia proposta por Suguio (1973).

Um dos princípios fundamentais em que se baseia a análise granulométrica que utiliza a pipetagem é que, em líquido estacionário, partículas de comportamento não coloidal ($d > 0,5 \mu\text{m}$) decantam com velocidades constantes, atingidas tão logo a resistência do fluido iguale-se à força da gravidade que age sobre a partícula. Em geral, a

velocidade de decantação das partículas depende do seu raio, da sua forma, da sua densidade, da sua textura superficial e da densidade e viscosidade do fluido.

Para a pipetagem foram utilizadas as amostras que silte e argila que passaram pela peneira de malha de 0,062 mm sob água corrente, e armazenadas em baldes de água. Esperamos 3 dias para decantação e retiramos a água excedente e passamos para uma proveta 1000 ml completando o volume com água destilada e adicionar 1 g de pirofosfato de sódio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_3$) (Fig.19).

Agitar com agitador manual e verificar se há floculação, fazemos a retiradas com pipetas volumétricas de 20 ml com pipetador acessório, previamente marcadas com caneta para retroprojctor (com tinta insolúvel) ou fita adesiva a distâncias de 10 e 20 cm da ponta, para auxiliar nas coletas, em tempos determinados e agitando manualmente a suspensão na proveta, e acionar o cronômetro ao mesmo tempo em que a agitação é cessada.

1ª retirada em: 0:58 minutos

2ª retirada em: 3:52 minutos

3ª retirada em: 7:44 minutos

4ª retirada em: 31:00 minutos

5ª retirada em: 123:00 minutos

Nos intervalos de tempo e nas alturas indicadas na tabela, coletar com a pipeta 20 ml da suspensão, os quais são colocados em recipientes de cerca de 50 ml (por exemplo béqueres de vidro) previamente pesados (peso ou massa M_1 dos recipientes vazios) e marcados com o código da amostra e respectivas frações granulométricas. Secar os recipientes em estufa, por até 48 h, a 50-60° C, ou até que toda a água seja evaporada.

Pesar os recipientes com o material seco (peso ou massa M_2); o peso do material seco nos recipientes será $M_f = (M_1 - M_2)$; os resultados foram inicialmente anotados em uma ficha e posteriormente lançados em planilha Excel, que elabora gráficos de porcentagem por faixa granulométrica e curva acumulada e calcula os valores absolutos e em porcentagem para cada fração granulométrica; a planilha corrige automaticamente os valores em peso obtidos nas diversas frações granulométricas, de forma que o valor final do peso medido da amostra seja igual ao valor inicial.

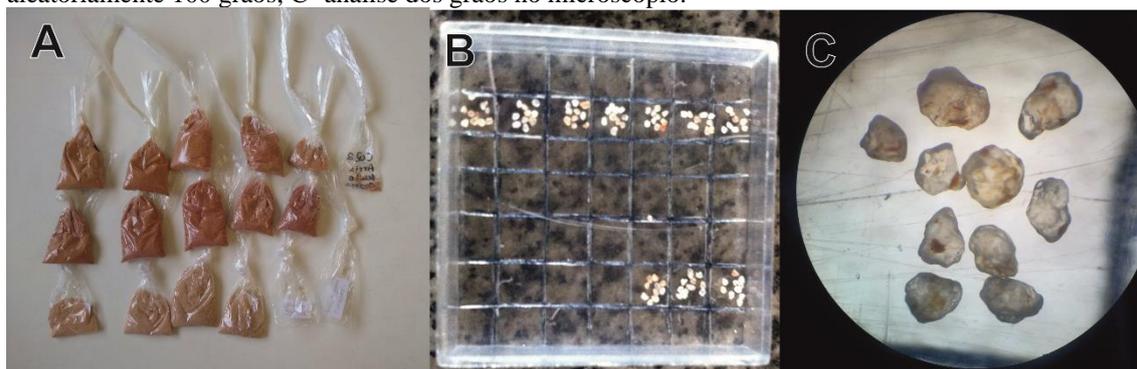
Forma dos grãos

Enquanto estavam sendo peneiradas e pesadas, foram separadas as amostras de cada peneira para posterior análise da morfometria e morfoscopia dos grãos, que utiliza um microscópio para o estudo da forma dos sedimentos (Fig. 20).

A forma dos grãos, que inclui o grau de arredondamento e esfericidade, foram analisadas por análise microscópica de 100 grãos de todas as frações granulométricas (Areia muito fina, areia fina, areia média, areia grossa, areia muito grossa e grânulos), conforme método de Suguio (1973). O arredondamento foi classificado de acordo com Folk e Ward (1957) em seis níveis: muito arredondado, arredondado, sub-arredondado, sub-angular, angular e muito angular.

O tipo de revestimento foi analisado por microscopia óptica com o objetivo de avaliar a quantidade de grãos que possuem uma película de óxido de ferro, de coloração avermelhada, revestindo os grãos de quartzo. Nas amostras do "Pós-Barreiras" essa análise foi realizada com grãos brutos e grãos lavados, para identificar a perda de óxido de ferro. As análises foram realizadas no Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica da UECE.

Fig. 20 - Análise de 100 grãos em cada distribuição granulométrica (Areia muito fina, areia fina, areia média, areia grossa, areia muito grossa e grânulos) em microscópio óptico para análise de arredondamento, esfericidade e revestimento. A- Separação de cada fração granulométrica; B- dessa fração se separa aleatoriamente 100 grãos; C- análise dos grãos no microscópio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fluorescência de Raios-X

A Fluorescência de Raios-X consiste em uma técnica não destrutiva que permite a identificação da composição e concentração de elementos presentes em uma amostra. Esta técnica incide raios-X para excitar os níveis eletrônicos de átomos de uma amostra desconhecida.

Quando uma amostra é irradiada por um feixe de raios-x, os átomos na amostra geram raios-X característicos que são emitidos da amostra. Tais raios são conhecidos como raios-X "fluorescentes" e possuem um comprimento de onda e uma energia específicas que são característicos de cada elemento. Conseqüentemente, a análise qualitativa pode ser feita pela investigação dos comprimentos de onda dos raios-X. Como

a intensidade dos raios-X fluorescentes é função da concentração, a análise quantitativa também é possível pela medição da quantidade de raios-X com o comprimento de onda específico de cada elemento.

As concentrações dos principais e oligoelementos foram estimadas usando a Fluorescência de Raios-X (XRF). Para isso, foi separada da amostra bruta cerca de 10 g, que foram maceradas e armazenadas em pequenos potes de plástico. Estes precisam ser lavados e esterilizados com álcool, para não conter nenhuma contaminação. As amostras foram feitas em parceria com o Laboratório de Raio-X do departamento de física da Universidade Federal do Ceará.

Posteriormente foi feita a correlação entre os principais elementos encontrados nas amostras de sedimentos do "Pós-Barreiras", são eles: alumínio (Al), cálcio (Ca), cloro (Cl), ferro (Fe), potássio (K), silício (Si), titânio (Ti) e zircônio (Zr). A correlação entre os elementos indica o comportamento deles na amostra em decorrência de outro elemento químico. Quando uma correlação é alta, os valores estão positivos (acima de zero) ou negativo (abaixo de zero) estão entre 0.6 e 0.8. Uma correlação média é quando os valores estão entre 0.4 e 0.6, e ela é baixa quando estão abaixo de 0.4.

Luminescência Opticamente Estimulada (LOE)

As datações foram realizadas utilizando os protocolos MAR (*Multiple Aliquot Regeneration*) e SAR (*Single Aliquot Regeneration*) (WALLINGA et al., 2000) no Laboratório Datação, Comercio & Prestação de Serviços LTDA. Esta metodologia de análise vem sendo, mais recentemente, apontada como a de maior precisão na datação de depósitos sedimentares (TATUMI et al., 2008; ROSSETTI et al., 2011; ROSSETTI, et al., 2013).

Primeiramente é feita a preparação das amostras, os tubos são abertos em ambiente de luz vermelha na extremidade interna de inserção que deve ser indicada. Posteriormente passam por um tratamento químico com H₂O₂ (20%), HF (20%) e finalmente HCl (10%), sendo que as lavagens intermediárias são efetuadas com água destilada. Após tratamento químico as amostras são secas e peneiradas separando em uma fração granulométrica na faixa de 100-160 µm (100-60 Tyler), obtendo assim material Natural (quartzo/feldspato) isentos de materiais orgânicos e/ou metais pesados, e com granulometria bem homogênea.

A partir da amostra de material Natural é separada uma porção que é submetida à radiação solar por um período de aproximadamente 20 dias para decaimento Residual

(TL / OSL). Desta porção são separadas várias amostras que são irradiadas (fonte de ^{60}Co (^{455}Ci)) em várias doses pré-definidas (Gy), que devem estar próximas a dose acumulada Natural para montagem da curva de calibração.

O protocolo MAR é feito para determinar uma idade média a partir de apenas 1 curva de calibração feita (normalmente aceito para publicações nacionais, teses, etc.) Em procedimentos de datação por alíquotas múltiplas (MAR) é utilizada cerca de 20 alíquotas para se obter um único valor de P, com uma curva de calibração e conseqüentemente, é obtida uma única idade. Cada alíquota era usada para ser irradiada com doses diferentes e crescentes de radiação ionizante e algumas eram separadas para a medição da LOE natural.

O protocolo SAR é feito para determinar uma idade média entre pelo menos 10 a 20 alíquotas, ou seja, são feitas de 10 a 20 curvas de calibração e encontradas de 10 a 20 idades. É possível construir um histograma de idades e interpretar a variação na amostragem (normalmente exigido pelos revisores de revistas internacionais) (WALLINGA et al., 2000).

6.3 Resultados

Os dados sedimentológicos analisados nas falésias na costa leste do Ceará comprovam que a deposição e origem do material são diferentes dos sedimentos da Formação Barreiras, de origem Miocênica. Sua origem é terrígena devido a sua composição geoquímica (72% de Si e 13% de Al) e granulometria associada a transporte fluvial (composição variando entre cascalho, areia, silte e argila).

A seção estratigráfica das falésias mostra três conjuntos distintos representados pelas Formações Barreiras, Tibau e outra superior arenosa similar aos depósitos "Pós-Barreiras". Esta última se estende por todo litoral leste cearense e está presente nas falésias ativas e paleofalésias do estado conforme mapeamento de Silva et al. (2020).

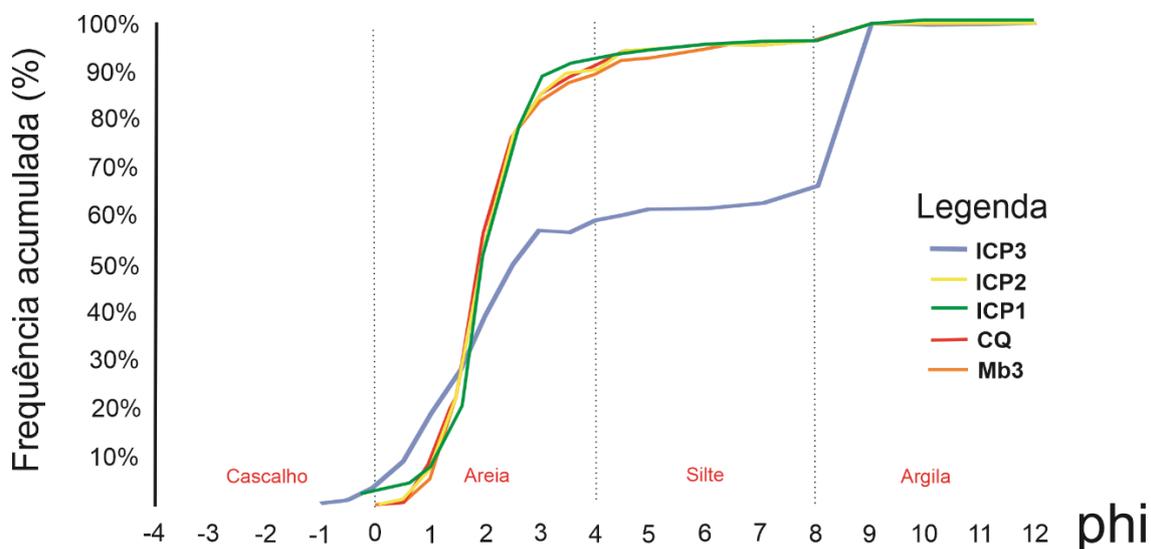
As idades encontradas nas falésias dos depósitos "Pós-Barreiras" do litoral leste do Ceará foram de 55.200 ± 4.040 anos (Morro Branco), 49.000 ± 3.260 (Canoa Quebrada) e 95.850 ± 5.500 anos nas falésias do patamar superior da praia de Peroba (Icapuí).

6.3.1 Sedimentologia

- Granulometria

As falésias esculpidas na Formação Barreiras foram classificadas como areno-argilosas (60% de areia e 40% de silte/argila) pobremente selecionada, platicúrtica e com assimetria positiva. Os sedimentos dos depósitos "Pós-Barreiras" são predominantemente arenosos (90% de areia e 10% de silte/argila) pobremente selecionado, leptocúrtica e com assimetria positiva. (Fig. 20).

Figura 20- Gráfico de frequência acumulada das amostras de granulometria das falésias do litoral leste do Ceará, coletadas em Morro Branco (Mb3), Canoa Quebrada (CQ) e Icapuí (ICP1 e 2), confrontadas com a Formação Barreiras (ICP3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo o gráfico de classificação de Folk e Ward (1957) dos sedimentos finos, a Formação Barreiras está classificada como Areia argilosa, enquanto quase todas as amostras coletadas das falésias estão classificadas como Areia (Fig. 20).

- Forma dos grãos

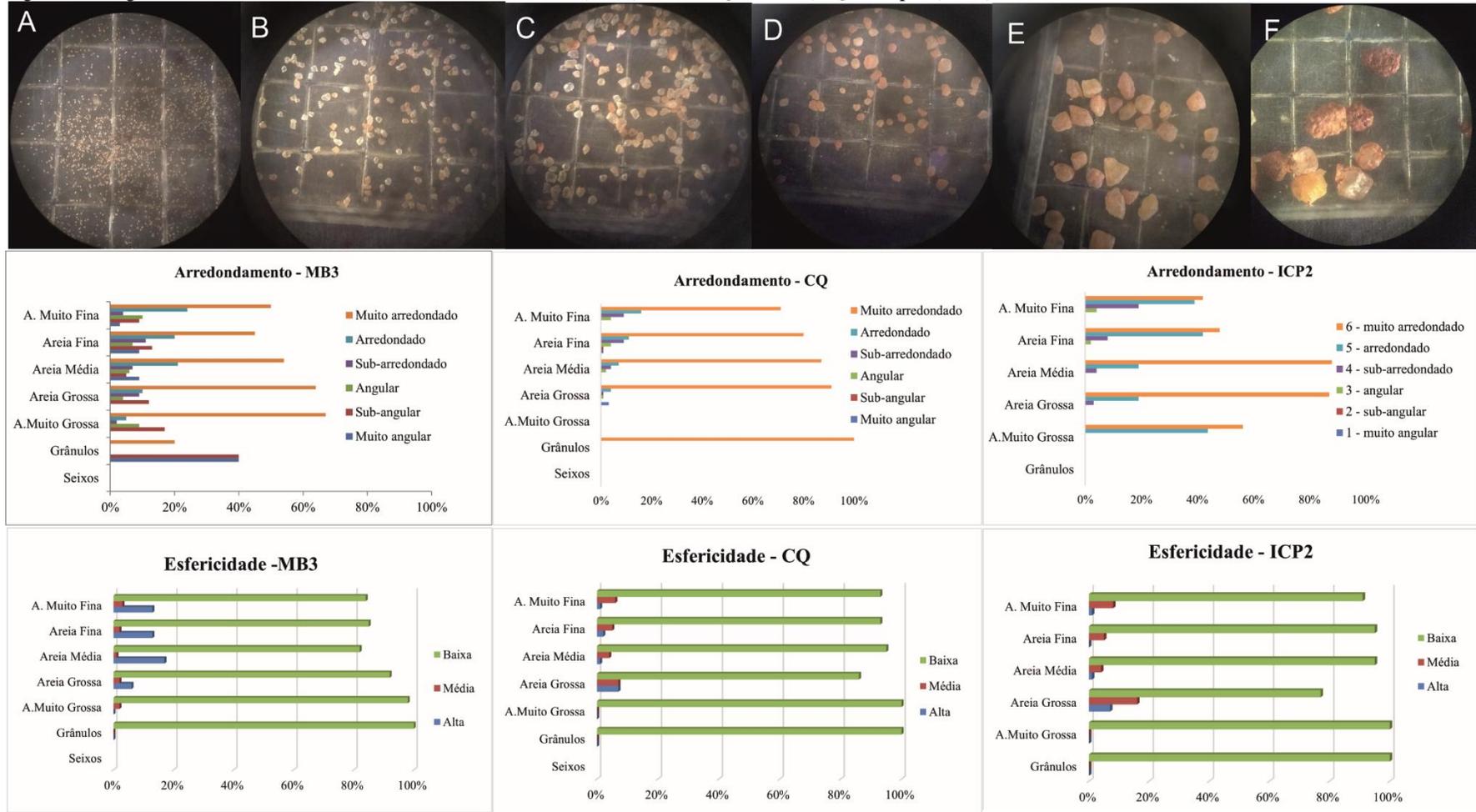
Os sedimentos dos depósitos de "Pós-Barreiras" das praias de Morro Branco, Canoa Quebrada e Peroba (Icapuí) variam de arredondado a muito arredondado. Os sedimentos das falésias de Morro Branco apresentaram os grãos um pouco mais sub-angulares e angulares do que nos outros setores amostrados. Os gráficos dos resultados das amostras de arredondamento e esfericidade se encontram na figura 21.

Apesar dos grãos apresentarem arestas arredondadas, eles não se assemelham a uma esfera perfeita, com formas mais achatadas e baixa esfericidade. A porcentagem de esfericidade baixa foi representativa entre 90% e 95% das amostras, exceto nos sedimentos das falésias de Morro Branco. que nas frações de areia média, areia fina e areia muito fina a porcentagem de esfericidade baixa foi de 80%. Com o aumento do transporte para a costa, os sedimentos tornaram-se cada vez mais maduros e arredondados (MABESOONE et al., 1971).

Os revestimentos dos grãos alaranjados das falésias apresentaram resultados distintos comparando a mesma amostra antes e depois de sua lavagem (Fig. 22). Nas frações mais grossas de grânulos, areia muito grossa, areia grossa e areia média o resultado ficou entre 95% e 100% de revestimento de óxido de ferro no grão de quartzo. A partir da granulometria de areia média, areia fina e muito fina, o revestimento diminuiu cerca para valores entre 50% e 75% da amostra, sendo a fração mais fina a que apresenta menores valores de revestimento no grão.

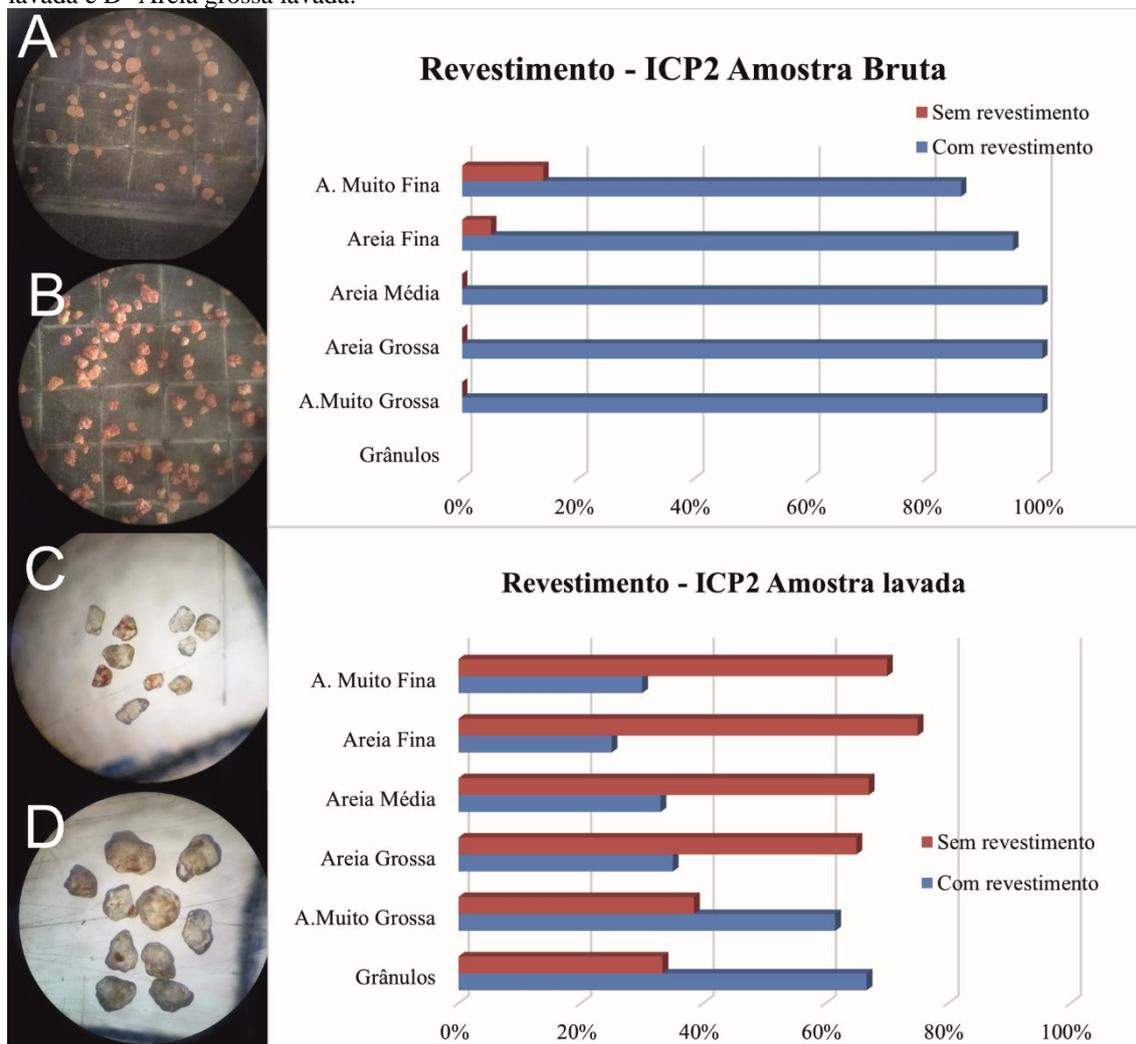
Comparando o revestimento entre as amostras brutas e lavadas nas falésias de Morro Branco e Canoa Quebrada, foi feito apenas com as frações 1ϕ (areia grossa) $1,5\phi$ e 2ϕ (areia média), e o resultado foi de 80% dos grãos possuíam o revestimento de óxido de ferro, reduzindo em 20% o revestimento na lavagem dos grãos (Quando se separa as frações de areia e as de silte e argila).

Figura 21- Resultado do arredondamento e esfericidade dos grãos com a classificação granulométrica A- areia muito fina; B- areia fina; C- areia média; D- areia grossa; E- areia muito grossa e F- grânulos nas falésias nas falésias de Morro Branco (MB3), Canoa Quebrada (CQ) e Icapuí (ICP2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22- Resultado do revestimento dos grãos com a classificação granulométrica grânulos, areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina das falésias de Icapuí (ICP2) analisadas em grãos brutos (A, B) e depois de lavados (C, D). A- Areia média bruta; B- Areia grossa bruta; C- Areia média lavada e D- Areia grossa lavada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.2 Geoquímica

A geoquímica mostra a composição das amostras, ou seja, os elementos químicos que formam os sedimentos das falésias litoral leste do Ceará. O resultado indica o caráter de cimentação das amostras, o motivo da coloração, a origem do sedimento, entre outros.

A composição química das amostras dos sedimentos "Pós-Barreiras" são Silício (72.48%), Alumínio (13.75%), Potássio (6.68%) e Ferro (3.38%) e Titânio (1.15%). Os elementos secundários são Cloro (0.99%), Cálcio (0.69%), Zircônio (0.15%). E os elementos traço são Argônio (Ar), Cádmio (Cd), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Sódio (Na), Enxofre (S), Estrôncio (Sr) e Tecnécio (Tc) (Tabela 3).

Além disso, os elementos argônio (Ar), cádmio (Cd), tecnécio (Tc) foram encontrados apenas na amostra das falésias do patamar superior de Peroba (Icapuí). O manganês (Mn) foi encontrado apenas na amostra das falésias alaranjadas de Canoa Quebrada e o magnésio (Mg) na amostra de falésias alaranjadas da praia de Morro Branco. Em canoa Quebrada, na amostra da escarpa das falésias "Pós-Barreiras" próximo ao Porto canoa, foram encontrados os elementos sódio (Na) e enxofre (S) (Tabela 5).

Tabela 5- Composição química dos sedimentos das falésias do litoral Leste do Ceará. Praia de Morro Branco (MB1, MB2, Mb3), Canoa Quebrada (CQ) e Praia de Peroba-Icapuí (ICP1, ICP2 e ICP3). Sendo a Formação Barreiras representada pelo ICP3.

%	MB 1	MB 2	MB 3	CQ	ICP 1	ICP 2	Média	Desvio padrão	ICP3
Ag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.21	0.00
Al	14.68	19.56	11.15	16.75	9.39	10.65	12.92	3.64	13.73
Ca	0.91	0.63	0.55	0.00	0.00	0.47	0.51	0.33	0.44
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	0.17	0.00
Cl	0.53	1.46	2.36	0.00	0.00	0.00	0.27	0.91	0.40
Fe	4.85	3.33	27.11	2.86	1.38	3.44	3.39	9.09	18.02
K	4.05	2.33	5.87	7.72	10.14	7.51	6.69	2.56	1.09
Mg	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Si	73.74	70.69	51.41	71.23	75.97	76.88	72.48	8.66	64.33
Sr	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00
Tc	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.03	0.00
Ti	0.98	1.82	0.00	1.33	1.85	0.91	1.16	0.63	1.63
Zr	0.26	0.18	0.00	0.11	0.17	0.14	0.16	0.08	0.36

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da correlação indica uma correlação negativa alta entre os elementos Silício com o Ferro (-0.74), ou seja, quanto maior for o valor de silício na amostra menor será o de ferro. Outras correlações negativas altas foram entre o cálcio e o potássio (-0.66), e entre o cloro e o silício (-0.65) (Tabela 6). As correlações positivas altas foram entre o silício e o titânio (0.77), ou seja, elas são diretamente proporcionais, quando os valores de silício sobem os valores de titânio também sobem. Outras correlações positivas altas foram entre os elementos zircônio e titânio (0.74) e entre os elementos silício e zircônio (0.65).

Tabela 6- Correlação de todos os elementos encontrados nas amostras dos sedimentos nas falésias do litoral leste do Ceará (nas praias de Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí).

	Al	Ca	Cl	Fe	K	Si	Ti	Zr
Al	0							
Ca	0.2927	0						
Cl	0.3662	0.4489	0					
Fe	-0.2965	0.1471	0.044	0				
K	-0.4573	-0.6629	0.1152	-0.1432	0			
Si	-0.128	-0.2504	-0.6502	-0.7498	-0.0289	0		
Ti	-0.0001	-0.2701	-0.5835	-0.5338	-0.2838	0.7763	0	
Zr	0.0236	0.3194	-0.2512	-0.5061	-0.4869	0.6555	0.7481	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7- Resultados das porcentagens de óxidos das amostras das falésias, da Formação Barreiras e de uma película ferruginosa encontrada na escarpa das falésias de Peroba (Icapuí).

%	MB3	CQ	ICP2	Formação Barreiras (ICP3)	Película Ferruginosa
Al₂O₃	17.87	15.59	12.97	22.93	9.93
SiO₂	77.39	78.97	82.1	63.73	39.07
Cl	0.17	0.51	0	0	0
K₂O	1.57	1.32	2.86	0.16	1.23
CaO	0.39	0.31	0.19	0.24	0
TiO₂	0.49	1.16	0.44	2.09	0.25
Fe₂O₃	2	1.9	1.37	10.46	48.53
ZrO₂	0.09	0.14	0.04	0.18	0.048
MnO	0	0.07	0	0	0.86
CdO	0	0	0	0.18	0
Ki = SiO₂/Al₂O₃	4.33	5.06	6.32	2.77	3.93
Kr = SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃)	3.89	4.51	5.72	1.9	0.66

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para identificar as porcentagens de óxidos presentes nas amostras dos sedimentos, foram separadas 5 amostras principais, são elas: falésias alaranjadas de 1-Morro Branco (MB3), 2-Canoa Quebrada (CQ), 3- Icapuí (ICP2), 4-Formação Barreiras avermelhadas

(ICP3) e da 5-película ferruginosa preta presente na escarpa das falésias do patamar superior branco nas falésias de Icapuí.

Os principais óxidos encontrados foram o óxido de silício SiO_2 (cerca de 80% das amostras), óxido de alumínio Al_2O_3 (cerca de 15% das amostras), óxido de ferro Fe_2O_3 (cerca de 2% das amostras) e o óxido de potássio K_2O (cerca de 1.8% das amostras). A concentração do Óxido de Ferro (Fe_2O_3) é reduzida comparado ao teor encontrado na Formação Barreiras, de 10.46%, e da película ferruginosa chega a 48.53% (Tabela 7).

- Película ferruginosa

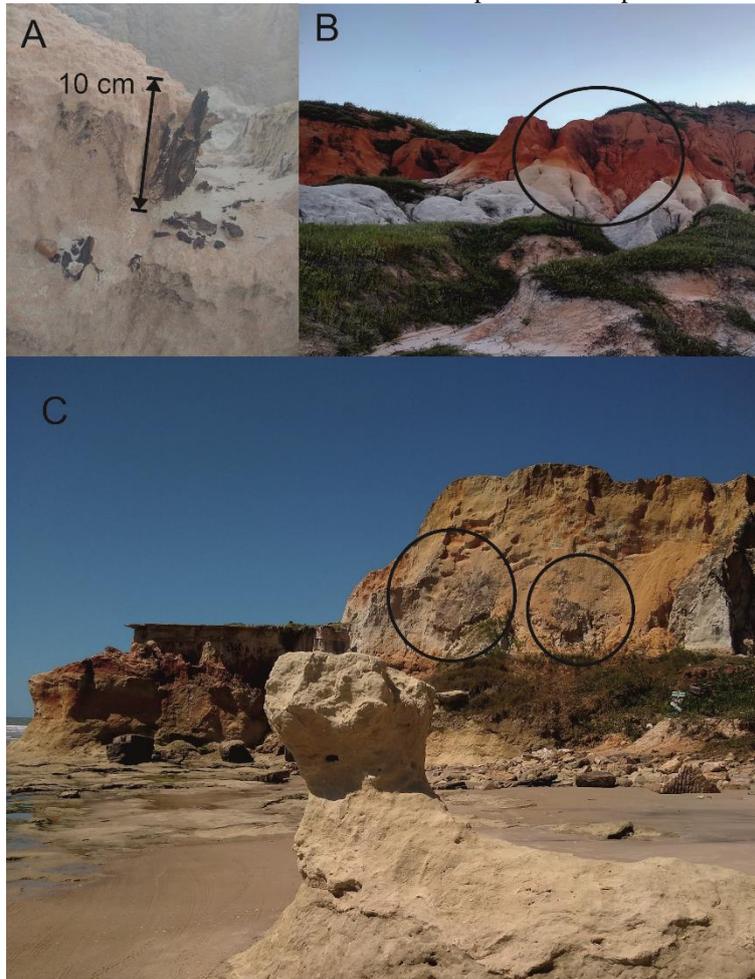
Níveis importantes de óxidos de ferros que foram encontrados na escarpa das falésias com uma coloração escura, possuindo uma tonalidade preta e está localizada na escarpa próximo ao topo, chamada de película ferruginosa (Fig. 23). O nome se dá devido aos altos teores de ferro e óxido de ferro encontrados nesta coloração. Foi recolhido uma amostra desta película na praia de Peroba (Icapuí), na escarpa das falésias no patamar superior.

Essa película foi encontrada nas falésias arenosas da praia de Morro Branco, nas paleofalésias do Uruaú (Beberibe), no topo das falésias ativas de Canoa Quebrada e nas falésias do patamar escalonado de Peroba (Icapuí).

A composição referente aos óxidos é formada por 48.53% de óxido de ferro (Fe_2O_3), 39% de óxido de silício (SiO_2), 9.93% de óxido de alumínio (Al_2O_3) e 1.23% de óxido de potássio (K_2O) que é um óxido básico; e os elementos principais são 61.73% de Ferro (Fe), 27.38% de Silício (Si), 7.63% de alumínio (Al), 1.64% de Potássio (K) e 1.17% de Magnésio (Mg).

Os resultados mostram que a porcentagem de óxido de ferro é de 48.53% (Tabela 7). A partir desse óxido e dos valores de óxido de silício (SiO_2) e do óxido de alumínio (Al_2O_3) é possível calcular o índice de intemperismo químico desta amostra. O cálculo é de acordo com Harrassowitz et al., (1927), cujos valores dos índices de K_i e K_r abaixo de 1.33 são considerados laterita verdadeira, e valores entre 1.33 e 2.00 é classificado como solo laterítico. O resultado dos índices de intemperismo K_r da película ferruginosa é de 0.66, classificada como laterita verdadeira (Tabela 7).

Figura 23 – A- Película ferruginosa encontrada nas falésias do patamar superior na praia de Icapuí (ICP 2); B- Falésias de Icapuí onde é possível ver na escarpa da falésia onde está circulado uma capa de sedimentos mais escuros; C- Falésias de Morro Branco onde também está presente uma película ferruginosa na escarpa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.3 Cronologia e evolução

As idades encontradas nas falésias do litoral leste do Ceará foram de 55.200 ± 4.040 anos nas falésias de Morro Branco, 49.000 ± 3.260 anos nas falésias de Canoa Quebrada e 95.850 ± 5.500 anos nas falésias do patamar superior da praia de Peroba (Icapuí) (Tabela 8).

O resultado indica que a deposição dos sedimentos das falésias de Icapuí ocorreram primeiro há 95.000 anos, e cerca de 40.000 anos depois foi depositado os sedimentos de Morro Branco e 6.000 anos depois os de Canoa Quebrada, sendo a mais recente.

Essa diferença de aproximadamente 50 ka entre as deposições no Ceará ocorre pela diferença entre os Estágios Isotópicos Marinheiros (EIM), no qual as falésias de Morro Branco e Canoa Quebrada estão no EIM 3 e as de Icapuí no EIM 5c (Tabela 8).

Tabela 8- Resultado das datações LOE nas falésias do leste do Ceará (Morro Branco, Canoa Quebrada e Icapuí).

Amostra	Dose Anual ($\mu\text{Gy/ano}$)	P (Gy)	Desvio padrão	Idade (anos)	Estágio Isotópico Marinho
Morro Branco	985 \pm 50	54,3	2,8	55.200 \pm 4.040	EIM 3
Canoa Quebrada	955 \pm 45	46,8	2,2	49.000 \pm 3.260	EIM 3
Peroba (Icapuí)	1.050 \pm 50	100,8	3,4	95.850 \pm 5.500	EIM 5c

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.4 Estratigrafia

- Morro Branco (MB)

Nos depósitos das falésias de Morro Branco, o perfil estratigráfico é de 25 m e apresenta duas Formações geológicas que são os arenitos acinzentados da Formação Tibau e os arenos argilosos do "Pós-Barreiras". Os arenitos do "Pós-Barreiras" estão divididos em três camadas devido a sua coloração e composição.

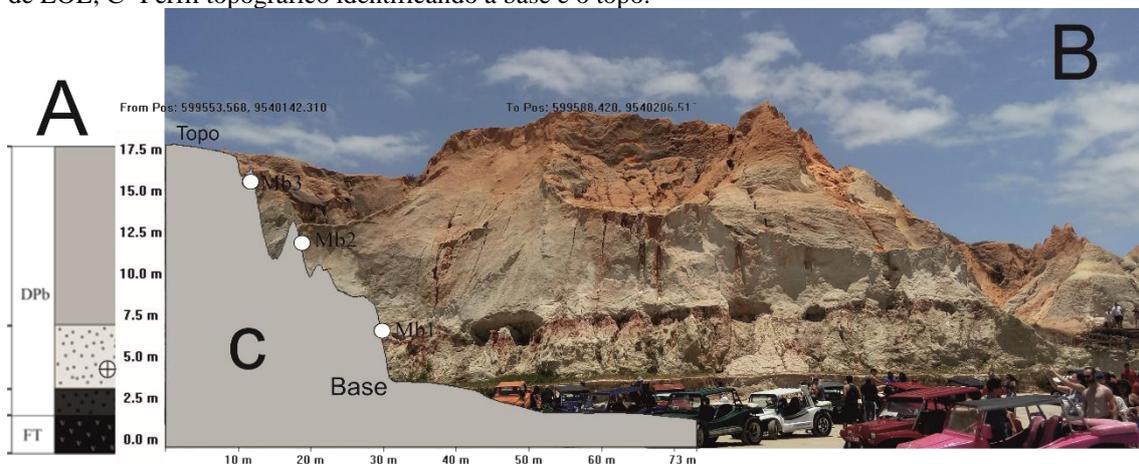
Cronologicamente, da base para o topo, o perfil inicia com arenitos acinzentado com diferentes graus de cimentação da Formação Tibau variando entre centímetros a 2 metros de altura, contados a partir da base das falésias, datada do Neocampaniano (Cretáceo superior, 80 Ma) ao Holoceno. O topo apresenta sedimentos semiconsolidados arenosos do Pós-Barreira depositados no Pleistoceno entre o último interglacial e o último máximo glacial.

As próximas camadas se diferem por sua coloração, uma avermelhada e outra esbranquiçada devido a concentração de Ferro (Fe) nas falésias. São compostas de um arenito argiloso, inconsolidados e maciços, variando entre 2 e 11 metros.

Essa facie superior entre 11 e 25 metros é caracterizada por um arenito argiloso, inconsolidados, maciço, de coloração alaranjada altamente erosiva, apresentando discontinuidades em seu perfil frontal, que são voçorocas causadas pelo escoamento superficial e erosão subaérea (Fig. 24). Esse padrão predomina nas falésias do litoral do Ceará.

Os grãos das camadas superiores são compostos de areia média e areia fina com alguns cascalhos visíveis na escarpa das falésias. Segundo a classificação geotécnica de Santos et al., (2005), a estrutura é granular, com poros pequenos inferiores a 1 mm de diâmetro, de consistência ligeiramente dura fracamente resistente à pressão, facilmente quebrável entre o polegar e o indicador, teor de umidade seco e o grau de cimentação é fracamente cimentado a massa cimentada é quebradiça, tenaz ou dura, mas pode ser quebrada nas mãos.

Figura 24- A- Estratigrafia do pacote sedimentar das falésias na praia de Morro Branco; B- Imagem da escarpa das falésias identificando onde foram coletadas as amostras sedimentares e a amostra para análise de LOE; C- Perfil topográfico identificando a base e o topo.



- FT Formação Tibau
- Dpb Depósitos “Pós-Barreiras”
- ⊕ Datação LOE - MB 55.200 ± 4.00 ka)
- Coleta de amostras sedimentares
- Arenito acizentado da Formação Tibau
- ▨ Mb2 - Arenito argiloso, semiconsolidado maciço de coloração esbranquiçado
- Mb1 - Arenito argiloso, semiconsolidado, maciço de coloração avermelhado
- ▨ Mb3 - Arenito argiloso, semiconsolidado, maciço de coloração alaranjado

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Canoa Quebrada (CQ)

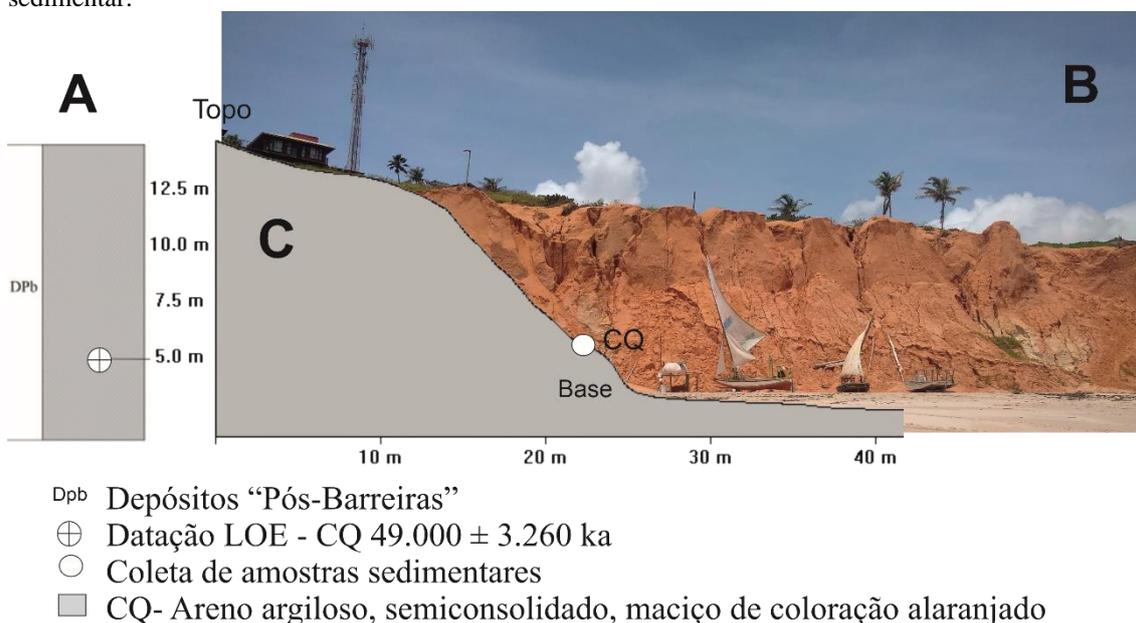
A estratigrafia das falésias da praia de Canoa Quebrada é composta por um único pacote sedimentar (Fig. 25-A). Este, por sua vez, é caracterizado por arenito argiloso, semiconsolidado, maciço, de coloração alaranjada e presença de vegetação herbácea e arbustiva no topo e em algumas partes da escarpa (Fig. 25-B). De acordo com as classificações geotécnicas de Santos et al., (2005) e identificadas in loco, esse pacote sedimentar possui estrutura granular, poros entre 1 e 2mm de diâmetro, ligeiramente dura

e fracamente resistente à pressão, facilmente quebrável entre o polegar e o indicador. Não foi encontrada água nos interstícios dos sedimentos, o grau de cimentação baixo, ou seja, a massa cimentada é quebradiça, tenaz ou dura, mas pode ser quebrada nas mãos.

A altura da estratigráfica fica em torno de 17m, podendo variar entre 13 e 23m, com perfil de falésias ativas escarpada na parte superior e muitas vezes com cicatrizes de desmoronamento e base solapada (Fig. 25-C), indicando uma área momentaneamente estável das falésias ativas com processos erosivos cíclicos. A amostra para datação LOE foi coletada a 1.5m de altura.

Esse perfil alaranjado presente em toda as falésias de Canoa Quebrada ocorre também em pontos isolados, como nas falésias na praia do Pacheco (Caucaia), nas paleofalésias na praia de Barra Nova (Cascavel) e na parte superior das falésias ativas de Morro Branco, e nas paleofalésias de Icapuí, até a divisa do estado do Ceará com o Rio Grande do Norte.

Figura 25- A- Estratigrafia do pacote sedimentar das falésias de Canoa Quebrada identificando a posição da coleta de amostra LOE; B- Imagem da escarpa das falésias com cicatriz de desmoronamento, base solapada com presença de embarcações; C- Perfil topográfico indicando o topo, a base e a coleta sedimentar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

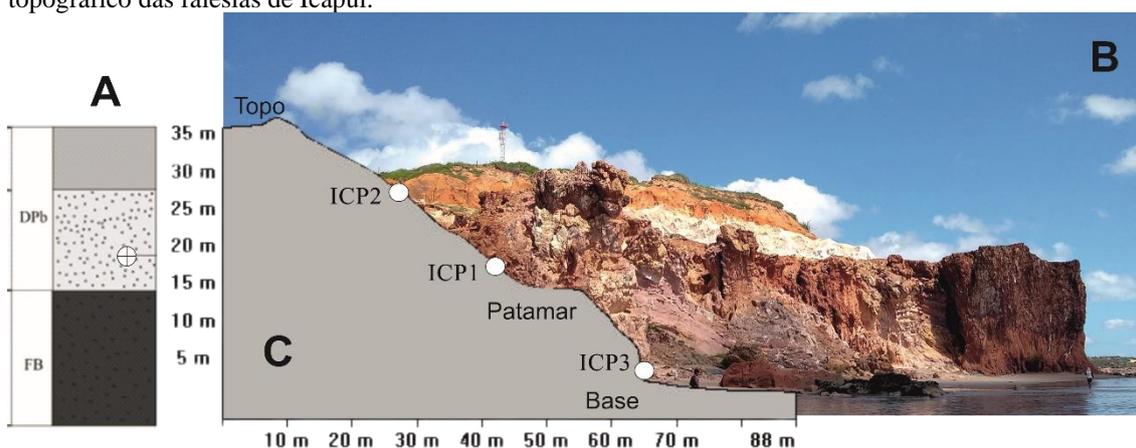
- Icapuí

O perfil estratigráfico das falésias da praia de Peroba (Icapuí) é o maior em altitude, com 42 metros, composto por um patamar escalonado, onde a falésia inferior é

composta pela Formação Barreiras inferior e a falésia superior por arenitos esbranquiçados e alaranjados. Esse patamar é formado pela ação dos processos erosivos subaéreos na litoestratigrafia (Fig. 26-A). O perfil superior mais arenoso e semiconsolidado é mais vulnerável à erosão do que o perfil inferior composto por arenitos fortemente cimentados de idade Miocênica.

O patamar superior possui um perfil de escarpa do tipo *bluff*, característico de paleofalésias devido a não influência erosiva marinha em sua base, com cobertura vegetal no topo e em partes de sua escarpa, que protege da erosão subaérea. A litologia é composta por areno argilosos, semiconsolidados, maciço de coloração alaranjada na porção superior (altitudes entre 32 e 42m) e esbranquiçada na porção inferior (altitudes de 17 a 32m) e com granulometria variando de areia média a fina com alguns cascalhos visíveis na escarpa das falésias (Fig. 26-C).

Figura 26- A- Perfil estratigráfico das falésias na praia de Peroba (Icapuí); B- Foto no local do patamar escalonado onde podemos ver claramente a diferença entre as escarpas superior e inferior; C- Perfil topográfico das falésias de Icapuí.



- DPb Depósitos “Pós-Barreiras”
- FB Formação Barreiras
- ⊕ Datação LOE - ICP 95.850 ± 5.500 ka
- Coleta de amostras sedimentares
- ICP1 - Areno argiloso, semiconsolidado, maciço de coloração esbranquiçado
- ICP2 - Areno argiloso, semiconsolidado, maciço de coloração alaranjado
- ICP3 - Arenito conglomerado de coloração avermelhada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a classificação geotécnica de Santos et al., (2005), a estrutura é granular, com poros inferiores a 1 mm de diâmetro, de consistência ligeiramente dura fracamente resistente à pressão, facilmente quebrável entre o polegar e o indicador. Teor de umidade

seco e o grau de cimentação é fracamente cimentado a massa cimentada é quebradiça, tenaz ou dura, mas pode ser quebrada nas mãos.

O patamar inferior é composto por arenitos da Formação Barreiras de origem Miocênica com idade variando entre 16 e 27 Ma (LIMA, 2008; MAIA, 2012), perfil extremamente escarpado com aproximadamente 20 metros de altura. Classificado como uma *Cliff* alcançando até 70° de inclinação, com presença de *notches* ou solapamentos em sua base com altura de 4 a 5m, sem cobertura vegetal e litologia de grãos pobremente selecionados com seixos, areias finas e silte e argila.

Sua cor é mosqueada, com predominância de tonalidades arroxeadas variando entre amarronzado, avermelhado, alaranjado e amarelado, de estrutura granular, sem poros visíveis, de consistência extremamente dura, ou seja, extremamente resistente à pressão e não pode ser quebrado com as mãos. O teor de umidade é seco e grau de cimentação extremamente cimentado. A massa cimentada não enfraquece sob prolongado umedecimento e é tão dura que, para quebrá-la, é necessário um golpe vigoroso com o martelo.

6.4 Discussões

6.4.1 Deposição e transporte sedimentar das falésias

De acordo com os resultados da granulometria apresentados a Formação Barreiras distingue os sedimentos dos depósitos das falésias do litoral leste do Ceará, pois se apresenta 30% mais lamosa. Além disso, os resultados comprovam que toda a sedimentação das falésias possui as mesmas características sedimentológicas e foram depositadas em um mesmo período no litoral leste do Ceará.

Os sedimentos das falésias areno argilosos, possuem uma cimentação graças ao óxido de ferro, isso explica a forma da escarpa manter se mesmo possuindo um depósito sedimentar composto de 90% de areia. Esses níveis mais cimentados de óxido de ferro estão relacionados a paleosolos também, essas concreções e essa camadas que são na maioria conglomerado estão diretamente relacionadas a paleoclimatologia (SAMPAIO, 2013).

A diferença na porcentagem de lama (silte e argila) indica um período com deposição na forma de leque fluvial corroborando com os resultados de Castelo- Branco

(2003) em Pontal de Maceió. A classificação dos depósitos cearenses se assemelha mais à classificação dos sedimentos do Pós-Barreira encontrados no Pará por Rossetti et al., (2001). Indicadores de origem eólica não são evidentes, considerando que as amostras são pobremente selecionadas, com teores de 10% de silte e argila e cascalhos esparsos.

Na Zona Bragantina no Pará, nos depósitos de Pós-Barreiras são predominantes as areias com granulometria grossa a muito grossa e mal selecionada, e arenito conglomerados com fragmentos de argila e concreções ferruginosas (ROSSETTI et al., 2001). Nos depósitos Pós-Barreiras do sul da Bahia descritos por Souza et al., (2016) foi observada a presença de areia grossa e muito grossa em altitude. A morfologia dos grãos, são características que não sustentam o argumento de origem dos sedimentos Pós-Barreiras, unicamente por processos eólicos.

Porém, no litoral da Paraíba, na região de João Pessoa, Gandini et al., (2014) descreveram os sedimentos "Pós-Barreiras" como de granulometria média a fina, com grãos arredondados e muito arredondados, associando esses sedimentos a deposição eólica em dunas costeiras. Descrição semelhante aos sedimentos do "Pós-Barreiras" encontrados na região do Rio Grande do Norte, associado a paleodunas relacionados a deposição eólica e tem a nomenclatura de Formação Potengi descritos por Sousa et al., (2008).

Além desses processos, Souza et al., (2016) afirmam que os sedimentos "Pós-Barreiras" foram depositados em ambiente de elevada energia, presumivelmente pela contribuição maior de processos marinhos com possíveis retrabalho eólicos. No contexto regional, a granulometria do Pós-Barreira pode estar associada à deposição fluvial e a períodos com influência eólica.

O grau de selecionamento fornece informações de condições de transporte e é reflexo direto das características hidrodinâmicas locais, onde um maior hidrodinamismo implica em uma maior uniformidade (FOLK & WARD, 1957). As amostras da Formação Barreiras e das falésias analisadas no trabalho apresentam grãos pobremente selecionadas, indicando que são depósitos situados próximos ao seu local de origem ou que o hidrodinamismo não foi suficientemente capaz de selecionar as partículas (ABUODHA, 2003), refletindo as características da sua área fonte (OLIVEIRA et al., 2018).

A predominância de silte e argila indicam características de baixo curso de ambiente fluvial, pois os sedimentos de dunas são classificados entre moderadamente e bem selecionados (MARTINS, 2003).

Em relação à curtose, as amostras de praias são mesocúrticas e sedimentos de dunas têm curvas relativamente mais inclinadas, mas ainda com tendências mesocúrticas (MASON e FOLK, 1958). Essa análise distinguiu as duas amostras, sendo a da Formação Barreiras platicúrtica, quando apresenta uma medida de curtose menor que a da distribuição normal, correspondem a sedimentos bimodais ou polimodais, ou seja, indicando baixa movimentação (DIAS, 2004). Os sedimentos do "Pós-Barreiras" foram predominantemente leptocúrticos, representando sedimentos unimodais, ou seja, um sedimento relativamente bem selecionado na parte central da distribuição, no caso areia, representando um ambiente de maior movimento (BARRETO et al., 2017).

Segundo Dias (2004), os valores de curtose estão relacionados às condições de movimentação no ambiente sedimentar. As amostras que apresentam distribuição leptocúrtica e muito leptocúrtica são de ambientes de maior movimentação; platicúrtica e muito platicúrtica são de ambientes de baixa movimentação; e distribuição mesocúrticas, de movimentação intermediária.

A análise da assimetria vem sendo adotada para interpretação de processos de deposição ou erosão em ambientes de sedimentos modernos. Os sedimentos das falésias apresentaram uma assimetria positiva.

Entre 10% e 20% dos grãos de areia fina e muito fina foram encontrados grãos com grau de arredondamento angular e sub-angular. A variação do arredondamento em relação ao tamanho do grão mostrou que nos sedimentos das falésias de Morro Branco a fração de grânulos apresentaram resultados e arredondamento mais angular.

Os resultados do peneiramento úmido das amostras das falésias do "Pós-Barreiras" indicaram uma porcentagem de 10% na classificação de silte e argila. Porém, analisando o revestimento de óxido de ferro dos grãos nas amostras brutas e lavadas, o revestimento foi reduzido em 20% no processo de lavagem dos grãos. E em relação a granulometria reduziu entre 50% e 75% da amostra, sendo a fração mais fina a que apresenta menores valores de revestimento no grão.

De acordo com os resultados de análise do revestimento dos grãos, essa fração de 10% de silte e argila podem estar relacionados também a retirada da camada de óxido de ferro que reverte os grãos das falésias do "Pós-Barreiras". Fazendo com que a cor dos sedimentos mude de vermelho alaranjado para um grão de quartzo transparente. Essa mudança é devido à chuva e aos agentes marinhos, que realizam a "lavagem" dos grãos quando desprendidos das falésias. É possível observar em dias chuvosos o volume

sedimentar alaranjado na região do pós-praia, estirâncio e antepraia. Poucos dias depois a tonalidade alaranjada desaparece.

Na amostra das falésias de Peroba (Icapuí) foi feita a análise dos grãos apenas com a amostra lavada, e resultou nas frações de grânulos e areia muito grossa o revestimento em torno de 75%. Nas outras frações (areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina) esse percentual cai para 25%. Isso comprova que a presença de água nos grãos das falésias alaranjadas do "Pós-Barreiras" perde cerca de 75% do seu revestimento, justificando a diferença de cores na escarpa das falésias de Morro Branco e Icapuí (Fig. 34).

Castelo-Branco (2003) analisou os sistemas deposicionais e dinâmica costeira do município de Aquiraz, estado do Ceará, e ressalta que os sedimentos da região estão impregnados por uma película de óxido de ferro. Assim como em Icapuí (SOUZA, 2017), Rio Grande do Norte (SANTOS JUNIOR et al., 2015).

Autores descrevem que a presença do óxido de ferro nos grãos está relacionada à sua cimentação (MAIA, 1993; CUNHA, 2004; LIMA et al., 2010; SANTOS JÚNIOR et al., 2015) explicando como os sedimentos arenosos friáveis permanecem unidos as falésias.

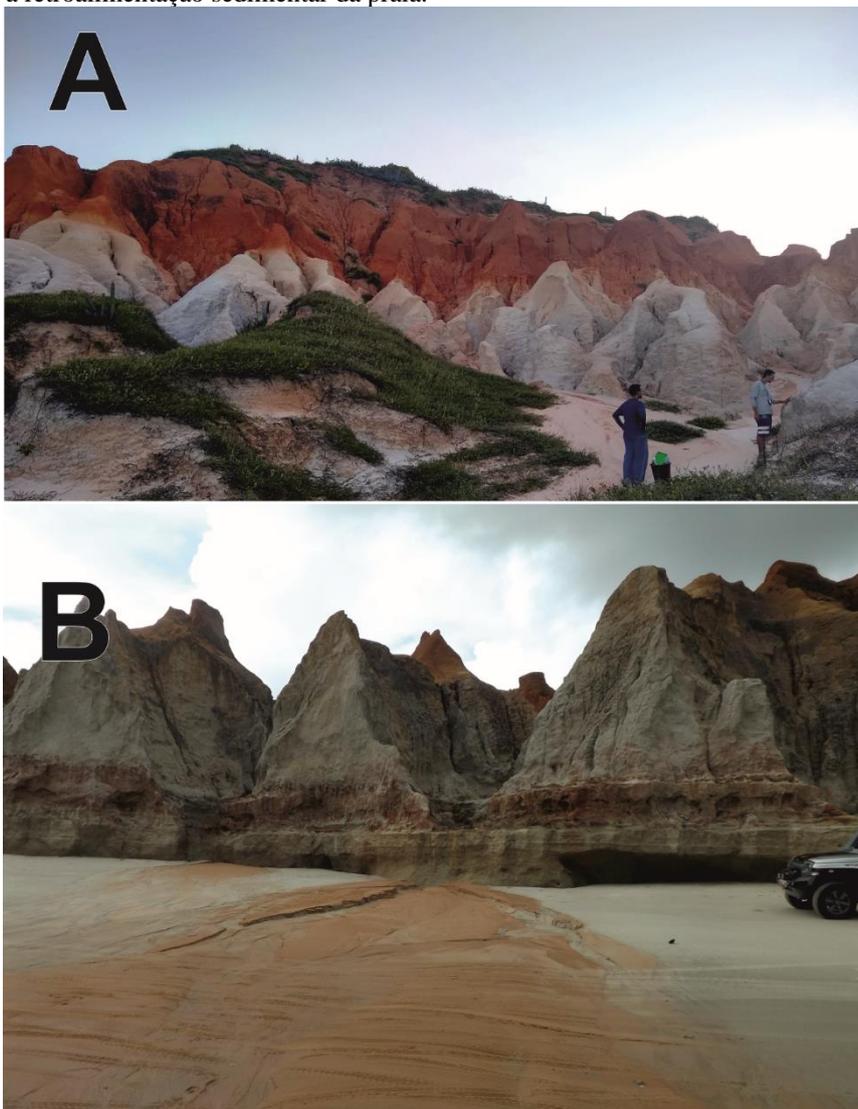
A fácies de sistema fluvial de canais entrelaçados consiste em areias cremes quartzosos com grãos de feldspatos, formando camadas maciças. As areias sofreram intemperismo, resultando na segregação de argila e do óxido de ferro que são depositados na base das camadas. A deposição do óxido de ferro forma níveis endurecidos e impermeáveis que afetam o comportamento mecânico e hidráulico das encostas (SOUSA, 2018).

A parte superior da escarpa das falésias possui uma tonalidade alaranjada e a parte inferior esbranquiçada, porém em Morro Branco a escarpa das falésias apresenta uma terceira avermelhada no limite com a Formação Tibau, na base das falésias. Essa coloração pode estar relacionada a lavagem da camada superior laranja, se tornando esbranquiçada na parte média, e todo o óxido de ferro fica acumulado na inferior e a torna avermelhada (Fig. 27). Como esse óxido não tem para onde escorrer, devido ao caráter rochoso da Formação Tibau, ele se concentra no limite entre as duas Formações.

A diferença de coloração alaranjada, esbranquiçada e avermelhada é decorrente da concentração de Ferro (Fe) oxidado em contato com o oxigênio atmosférico. A camada de coloração avermelhada apresenta o maior valor de ferro (Fe) entre as amostras do "Pós-Barreiras" de 27.10%, e camada intermediária esbranquiçada apresenta concentração de

3.32%, e a camada superior alaranjada apresenta concentrações de 4.84%. Comprovando esse transpasse de óxido de ferro entre as camadas na escarpa das falésias de Morro Branco.

Figura 27- Diferença de coloração (branca e laranja) nos sedimentos das falésias de A- Patamar superior no Icapuí e B- em Morro Branco, onde existe uma linha de coloração avermelhada entre os sedimentos arenosos superiores e a Formação Tibau na base. Também podemos ver a coloração alaranjada nas areias do estirâncio, no qual, a foto foi feita no período chuvoso, comprovando a importância dos sedimentos das falésias para a retroalimentação sedimentar da praia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4.2 Origem dos sedimentos das falésias

A composição química das amostras das falésias aponta para uma origem continental dos sedimentos com elementos principais o Silício (72.48%), Alumínio (13.75%), Potássio (6.68%), Ferro (3.38%) e Titânio (1.15%). Os sedimentos das falésias

fazem parte da Bacia Potiguar, conforme Bertani et al., (1990) estão associadas a três sequências deposicionais principais: uma continental, uma transicional e outra marinha.

O composto químico mais abundante na crosta terrestre combinado com o oxigênio é a sílica (SiO_2 - dióxido de silício) (GOMES et al., 2018). Os altos teores de silício e óxido de silício indicam que as amostras sedimentares das falésias do "Pós-Barreiras" são de origem continental. Os óxidos básicos são aqueles que ao reagirem com a água dão origem a bases, mas quando reagem com um ácido dão origem a sal e água (FOGAÇA, 2021). Além do óxido de potássio, que é normalmente encontrado em cinzas de madeira e de cigarros, outro óxido básico presente nas amostras do "Pós-Barreiras" é o óxido de cálcio (CaO) (Autor op.cit.).

Dentre os oito elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre, o ferro figura em quarto lugar com cerca de 5% em massa, os outros elementos são oxigênio (46,6%), silício (26,72%), alumínio (8,13%), cálcio (3,63%), sódio (2,83%), potássio (2,59%) e magnésio (2,09%) (DUARTE, 2017). O autor op.cit segue explicando que a água e a presença de oxigênio modulam a distribuição das várias espécies químicas de ferro e, conseqüentemente, o seu comportamento químico na natureza. A presença do óxido de ferro é descrita associada a coloração vermelho amarelado das falésias da Formação Barreiras (SOUZA, 2017). Isso explica a tonalidade e coloração das falésias do "Pós-Barreiras" na costa leste do Ceará.

Apesar da composição química das amostras apresentarem ferro em sua composição, esse sedimento não chega a ser considerado laterita, pois de acordo com Harrassowitz et al., (1926), que elaborou os índices de intemperismo químico, para ser laterita o índice K_i teria que ser menor que 2.00. Na amostra representante da Formação Barreiras o índice K_r foi de 1.90 indicando um solo laterítico, sendo mais uma comprovação que esses dois pacotes sedimentares não possuem mesma origem e Formação geológica.

A origem dos sedimentos dos depósitos pós Formação Barreiras é discutido por muitos pesquisadores em relação a sua origem continental ou marinha. Os sedimentos "Pós-Barreiras" na zona costeira da Bacia São Luís no Maranhão analisado por Rossetti et al., (2013) contém evidências de sedimentação eólica, isto é, também sob forma de dunas eólicas, possivelmente próxima da zona costeira.

O estudo feito por Souza et al., (2015) nas falésias na região oeste da planície do Recife mostrou que os sedimentos pós Formação Barreiras, com idades pleistocênicas (no máximo) constituídos de material retrabalhado tanto do embasamento quanto das falésias

formadas pela Formação Barreiras e sobre esse pacote sedimentar retrabalhado (RCB), ocorrem três terraços bem distintos TMP, TPH e TFM, o primeiro um marinho e pleistocênico, o segundo, marinho e holocênico e o último fluvial e com mangues.

Com base nas evidências regionais é possível confirmar a origem deposicional continental do "Pós-Barreiras" nas falésias do litoral cearense. Depósitos similares no litoral oeste do Ceará são descritos por Ximenes Neto et al., (2019), devido ao seu caráter inconsolidado e semiconsolidado estariam associados aos depósitos "Pós-Barreiras" e a Formação Camocim.

6.4.3 Cronologia e evolução das falésias

Investigações recentes feitas por Rossetti et al., (2013) enfocando depósitos da Formação Barreiras expostos no nordeste do Brasil, ao longo da faixa litorânea compreendida entre os estados do Ceará e Alagoas, permite considerações preliminares sobre a estratigrafia dos depósitos e sua possível analogia com estratos correlatos expostos no norte do Brasil. De modo geral, o arcabouço proposto para essa região acha-se reproduzido no litoral Nordeste, embora tenha se verificado que os depósitos "Pós-Barreiras" estejam mais bem desenvolvidos e, portanto, mostram um arranjo estratigráfico mais complexo.

Na base da sucessão ocorrem arenitos com diferentes graus de cimentação na escarpa das falésias. Presente na região do estirâncio e na base das falésias até a altitude aproximadamente de 2m, ocorre a sucessão de arenitos de coloração acinzentada da Formação Tibau. A base das falésias na praia de Morro Branco e outras adjacentes de acordo com Branco (2003) é interpretada como uma sedimentação típica de sistema fluvial entrelaçado, corresponde a um importante registro dos eventos finais da sedimentação da Bacia Potiguar.

A autora op.cit. segue explicando que seu afloramento nesse trecho do litoral leste do Ceará ocorre em função do arqueamento crustal decorrente da ação dos sistemas de falhas presentes no Graben Jacaúna, cujo contato com as fácies subsequentes, típicas de leques aluviais da Formação Barreiras, acontece por meio de uma superfície de erosão.

De acordo com as informações apresentadas nos estudos da Bacia Potiguar revisados por Branco (2003), a autora descreve a Formação Tibau sendo datada do Neocampaniano (Cretáceo superior, 80 Ma) ao Holoceno mapeados, principalmente, na porção submersa da bacia. Por vezes, aflorando na zona de interfácies entre os atuais

ambientes marinho e costeiro, estando ligado lateralmente com as formações Guamaré e Barreiras.

A análise estratigráfica integrada feita por Arai (2006) permitiu relacionar a origem do Grupo Barreiras com a elevação eustática global que teve seu máximo na parte média do Mioceno (12-20 Ma); a sedimentação do Barreiras *lato sensu* sofreu uma interrupção no Tortoniano (início do Mioceno), quando houve um rebaixamento global eustático que ocasionou um extenso evento erosivo nas áreas emersas e a formação de cunhas progradante na porção das bacias submersas (*offshore*). Com a retomada da subida eustática no Plioceno (Zancleano, 4-5 Ma), depositou-se o segundo ciclo, que o autor *op.cit* chama de Barreiras Superior. A erosão e o retrabalho da Formação Barreiras no Quaternário devem ter sido responsáveis pela atual configuração da plataforma continental.

Os sedimentos das falésias cearenses de origem continental são resultantes da fase rifte de idade Neocomiano a Barremiano (Cretáceo inferior); a sequência transicional de idade Aptiano/Eoptiano (Cretáceo médio), a sequência drifte de idade Albiano a Maastrichtiano/Campaniano, e ainda, um sistema marinho regressivo, de idade Maastrichtiano/Campaniano a Plioceno/Paleoceno/Terciário (BERTANI et al., 1990).

Segundo Branco (2003), a inter-relação das fácies do "Pós-Barreiras" e a geometria dos depósitos sedimentares descritos anteriormente permitiram reconhecer na área os sistemas Depositionais fluviais entrelaçados associados a subsistema deltaico e de leques aluviais. Segundo o modelo deposicional de leques aluviais, apresentado por Collinson (1981) apud Castelo Branco (2003), o pacote sedimentar pesquisado enquadra-se na fácies distal, constituído por fluxo aquoso, no caso fluxo de corrente, cuja granulometria dos sedimentos encontra-se no intervalo de areia média a fina. Os estudos comparativos deste sistema deposicional permitiram correlacioná-los aos depósitos areno argilosos, maciços, afossilíferos, de coloração avermelhada depositados no sistema deposicional de leque aluvial distal da Formação Barreiras.

Eventos morfogenéticos relacionados com a evolução com origem nos eventos eustáticos no período do quaternário na planície costeira de Icapuí é abordado por Meireles e Santos (2011)

“Onde determinou-se que o delta de maré (ebb-delta) foi originado através da evolução dos eventos eustáticos, estando representadas as fácies de pró-delta e delta superpostas como evento transgressivo e regressivo subsequente, desde a penúltima transgressão marinha. Está associado à evolução

da planície de maré e a laguna em contato com a linha de falésia morta (mapeada no capítulo 1). Como parte da fonte de sedimentos está vinculada aos máximos fluxos lagunar e fluviomarinho, certamente a fisionomia deltaica foi favorecida por estes eventos de grandes espasmos de sedimentos, principalmente na fase regressiva holocênica.

Principalmente os associados à evolução das falésias e as gerações de dunas, integraram-se com os efeitos erosivos e disponibilidade de areia durante os eventos transgressivos e regressivos, respectivamente.”

O resultado das datações nas falésias prova que a deposição desses pacotes sedimentares ocorreu no Pleistoceno Superior, ou seja, após milhões de anos da deposição da Formação Barreiras, que ocorreu durante o Mioceno entre 17,5 e 23,75 Ma (LIMA, 2008), podendo ser chamados de depósitos "Pós-Barreiras".

Essa desconformidade de aproximadamente 50 ka entre as deposições do "Pós-Barreiras" no Ceará justifica-se pela diferença entre os Estágios Isotópicos Marinhos (EIM), no qual as falésias de Morro Branco e Canoa Quebrada estão no EIM 3 e as de Icapuí no EIM 5c (Fig. 28).

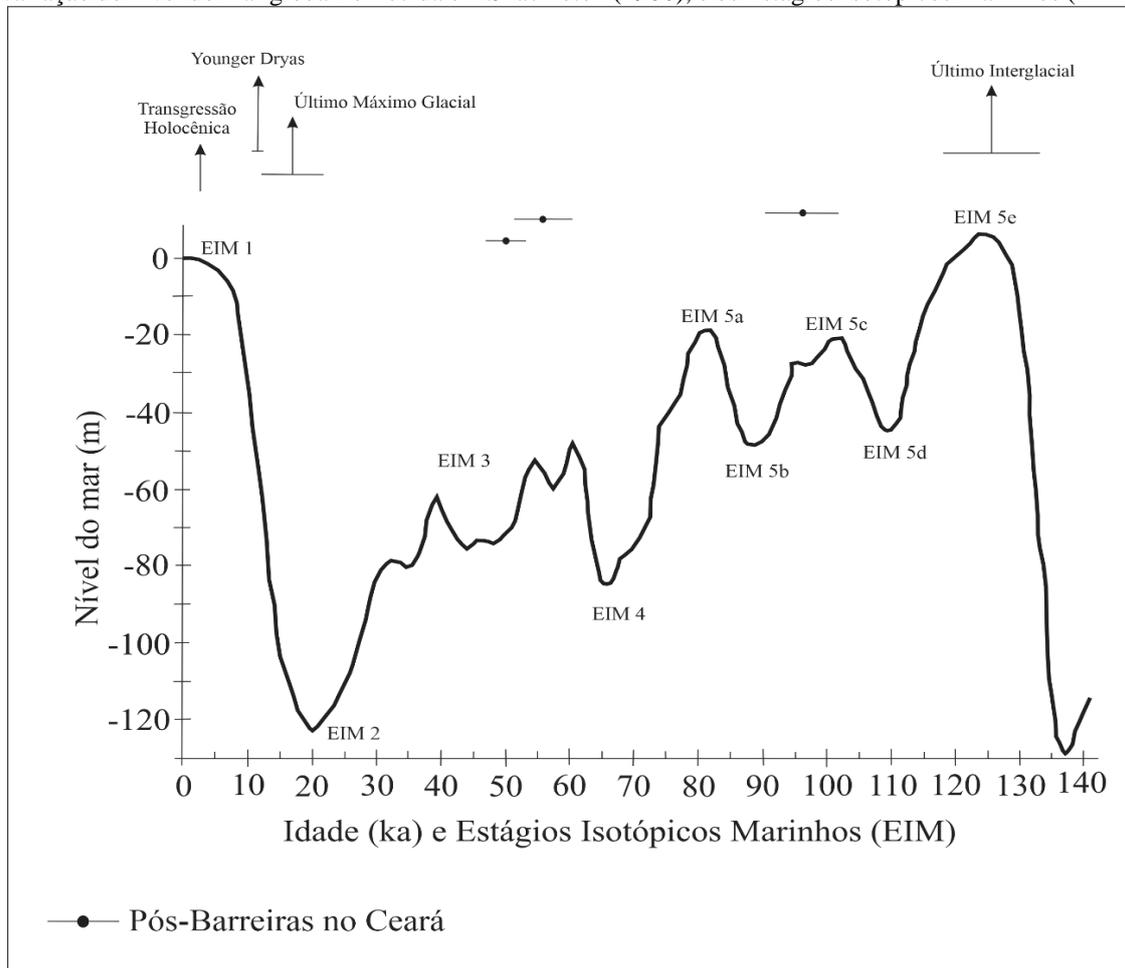
Os Estágios de Isótopos Marinhos (MIS) são estágios de isótopos de oxigênio marinhos ou estágios de isótopos de oxigênio (OIS), alternam períodos quentes e frios nos paleoclimas da Terra (LAMBECK e CHAPPELL, 2001). Descrito por Lisiecki, et al., (2005) os estágios são deduzidos de dados de isótopos de δ^{18} oxigênio que refletem mudanças na temperatura derivadas de foraminíferos (plâncton) que permanecem em núcleos de sedimentos marinhos perfurados no fundo do mar.

O autor op.cit explica que a contagem dos anos é feita para trás a partir do presente, que é MIS 1 na escala, estágios com números pares têm altos níveis de δ^{18} oxigênio e representam períodos glaciais frios, enquanto os estágios de números ímpares são vales nas figuras de oxigênio, representando intervalos interglaciais quentes (LISIECKI, et al., 2005). Alguns estágios, em particular o MIS 5, são divididos em sub-estágios, como 5a, 5c, 5e quente e 5b e 5c quente e frio Aitken e Stokes (1997).

Com isso, a deposição das falésias do "Pós-Barreiras" em Icapuí ocorreu no EIM 5c em um período glacial mais quente com nível do mar 20m abaixo do atual e seguindo para os dias atuais no EIM 4 foi um período glacial frio com nível do mar 90m abaixo do atual, impedindo a deposição de grandes volumes sedimentares. Depois veio no EIM 3, com nível do mar variando entre 50m e 80m abaixo do atual e temperatura entre +3° e +10° (VAN MEERBEECK et al., 2009), no qual depositaram os sedimentos das falésias

"Pós-Barreiras" em Morro Branco e Canoa Quebrada, sendo essas duas de idade contemporâneas (Figura 28).

Figura 28- Eventos de deposição sedimentar registrados na costa leste do Ceará em relação à curva de variação do nível do mar global fornecida em Shackleton (1988), e os Estágios Isotópicos Marinheiros (EIM).



Fonte: Modificado de Rossetti et al., (2013).

Falésias de gelo datadas na Sibéria também estão dentro do EIM 3 (WETTERICH et al, 2020) que é caracterizado globalmente, assim como nos trópicos e sub-trópicos úmidos como um período relativamente mais quente e mais úmido do que os períodos mais frios da última glaciação, marcado por sedimentação importante na Ásia, América do Sul, África e Oceania (PAISANI, 2014).

O EIM 3 (MIS 2-4) é chamado de Último Período Glacial e foi a última acontecida na Terra, e com ela se considera terminado o período Pleistoceno e as denominadas "glaciações antropológicas" por cientistas, devido ao fato de terem sido usadas para a travessia do homem para a América do Norte. As geleiras alcançaram a região ao sul onde hoje estão os estados norte-americanos da Califórnia e Nova Iorque, assim como áreas

onde estão a França, Alemanha e Polônia. Grande parte da Europa ficou congelada, com aspecto de estepe-tundra, como acontece hoje na Sibéria (Fullerton & Bush, 2004).

As condições climáticas para que ocorra tal deposição precisa de períodos de transição entre clima seco e úmido e tropical quente e úmido, com chuvas torrenciais pontuais para transportar esse volume de sedimentos para a zona costeira, e que foi modelado com as variações do nível do mar.

Em relação aos depósitos "Pós-Barreiras" estudados no Brasil, foi feita datação por LOE nos estados do Maranhão (ROSSETTI et al., 2013), Bahia (SOUZA et al., 2016a) e no Pará (TATUMI et al., 2008). Rossetti et. al (2013) no litoral do Maranhão (Norte do Brasil) encontrou três sucessões litológicas do "Pós-Barreiras". Estas estão associadas a deposição na zona litorânea, de granulometria fina a média, bem a moderadamente selecionada, com bioturbação e depósitos de dunas, com idades variando entre 84.000 ± 6.000 e 500 ± 100 anos, o que indica deposição entre o Neo-pleistoceno e Neo-holoceno. Das três sucessões encontradas por Rossetti et al., (2013), a sucessão 1 se encaixa no mesmo período das falésias das praias de Morro Branco e Canoa Quebrada (Fig. 28). As outras duas sucessões são de períodos mais recentes.

Souza et al (2016a) identificou a deposição dos sedimentos "Pós-Barreiras" no sudeste da Bahia do Pleistoceno tardio até o Holoceno (de 6.900 a 85.400 anos antes do presente), mesma cronologia identificada dos depósitos "Pós-Barreiras" do Ceará. A altitude dos sedimentos "Pós-Barreiras" entre 40 m e 150 m, segundo Souza et al (2016a) não pode ser associada a qualquer nível de elevação mar conhecida, o que surge a hipótese de processos de neotectônicos promovendo a elevação.

Os processos neotectônicos na praia de Icapuí são atuantes, e as falésias da Formação Barreiras possuem marcas de falhamentos e dobramentos descritos por Sousa (2002), Souza et al (2016) e Sousa et al., (2008), ou seja, as falésias da Formação Barreiras da praia de Peroba (Icapuí) estiveram rebaixadas e foram soerguidas até a altura atual. Processo semelhante foi observado na serra do Mel no litoral do Rio Grande do Norte (MAIA, 2012).

Tatumi et al., (2008) revelou uma ampla faixa de idades para os Sedimentos "Pós-Barreiras" no litoral do Pará, na margem do paleovale quaternário mapeado na Ilha do Marajó, foram depositados no final do período Pleistoceno ao Holoceno, com idades variando entre 430.000 anos e 3.400 anos antes do presente. Os autores op cit apontam que depósitos com idade similares, de até 40.000 anos AP, que se aproximam dos depósitos "Pós-Barreiras" do Ceará, são registrados no interior do paleovale a várias

dezenas de metros de profundidade, chegando, excepcionalmente, a 120 m de profundidade (ROSSETTI et al., 2008). Esta situação estratigráfica leva a supor que os sedimentos "Pós-Barreiras" são mais espessos do que os tradicionalmente registrados em superfície.

Maia (2012) realizou 40 pontos de coleta por LOE no Vale do rio Apodi-Mossoró (Rio Grande do Norte), área próxima dos depósitos "Pós-Barreiras" cearenses. As idades descobertas variaram de 319.000 anos antes do presente e 2.700 anos antes do presente, indicando variação do Pleistoceno tardio ao Holoceno. Esses dados demonstram que seu ambiente deposicional é bem mais recente do que a sedimentação da Formação Barreiras (17-22 Ma). Essas diferenciações de idades obtidas dentro da área de pesquisa possibilitaram a individualização em setores onde os processos de modelagem geomorfológica se dão a partir da erosão diferencial.

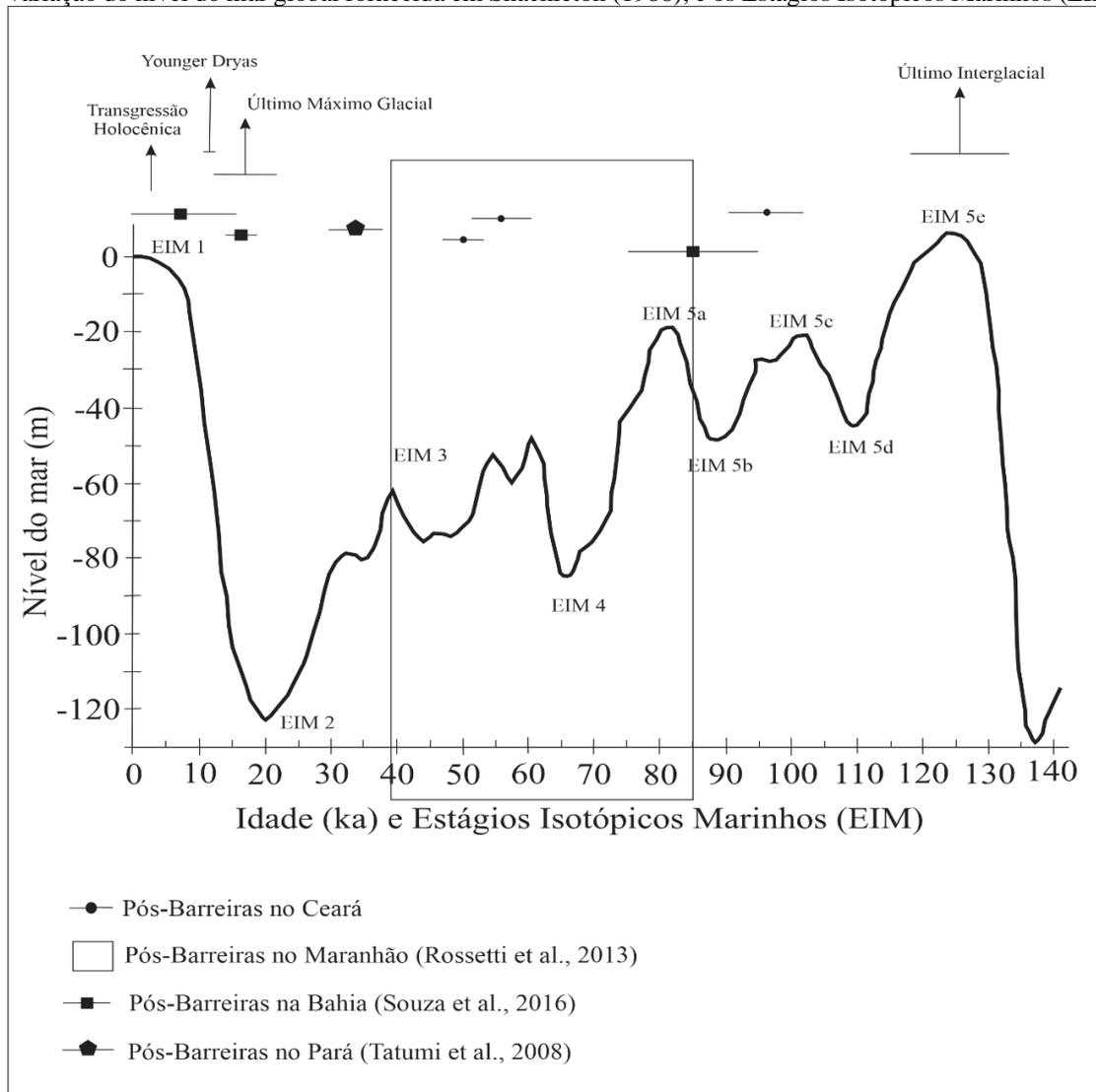
Com isso, foi possível identificar esses depósitos dentro dos Estágios Isotópicos Marinheiros (EIM), no qual a seção 1 de Rossetti et al., (2013) abrange os EIM 3, EIM 4 e EIM 5a, com idades variando entre 84.000 e 38.000 anos, correlacionando com os Depósitos "Pós-Barreiras" do Ceará (Falésias de Morro Branco e de Canoa Quebrada). Os depósitos da Bahia estão classificados no EIM 5a, 5b e um pouco do 5c, sendo a deposição mais próxima dos depósitos cearenses de Icapuí. Além disso Tatumi et al., (2008) no Pará encontraram idades "Pós-Barreiras" variando entre 430.000 anos e 3.400 anos, porém os depósitos com litologia mais parecidos com os do Ceará se encontram na faixa de 34.000 ± 4.000 anos, próximo da classificação EIM 3 (Fig. 29).

Diante dos resultados apresentados de cronologia das falésias é possível observar que as deposições do "Pós-Barreiras" no nordeste do Brasil predominam em Estágios Isotópicos Marinheiros de números ímpares, representando intervalos interglaciais quentes, com níveis de mar variando entre 20m e 50m abaixo do atual.

No Oeste da Índia, Bhattacharya et al (2017) investigou as sucessões aluviais na planície aluvial do norte de Gujarat, que indica a arquitetura aluvial e proxies geoquímicos a prevalência de um Summer Monsoon Indiano reforçado (ISM) com flutuações entre o estágio isotópico marinho tardio 3 (MIS 3; 37 ka) e o início do MIS 2 (27 ka). O estudo sugere que a variabilidade no ISM para a migração latitudinal da Zona de Convergência Intertropical foi causada por eventos de resfriamento e aquecimento conduzidos por insolação no Atlântico Norte.

Ao considerar os mapeamentos desses depósitos no Estado do Ceará, a aplicação da nomenclatura nas cartas de geologia com “Indiviso”, dentro do Grupo Barreiras, porém, estas estão associados aos depósitos do "Pós-Barreiras".

Figura 29- Eventos de deposição sedimentar registrados no Nordeste do Brasil em relação à curva de variação do nível do mar global fornecida em Shackleton (1988), e os Estágios Isotópicos Marinheiros (EIM).



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 Conclusões

Toda a sedimentação das falésias possui as mesmas características sedimentológicas e foram depositadas em um mesmo período no litoral leste do Ceará, diferentes dos sedimentos da Formação Barreiras, de origem Miocênica. Sua origem é terrígena devido a sua composição geoquímica (72% de Si e 13% de Al) e seu transporte está associado a deposição fluvial.

O depósito possui também quantidades significativas de Ferro (Fe) que justificam as tonalidades da escarpa das falésias, que variam de esbranquiçada, alaranjada e avermelhada, em alguns pontos pretos, e películas ferruginosas chegando ao nível de uma laterita verdadeira.

Além disso, a presença do óxido de ferro nas falésias areno argilosos estão conectados a cimentação da escarpa, mantendo, assim, sua forma mesmo possuindo um depósito sedimentar composto de 90% de areia.

A seção estratigráfica das falésias estudadas mostra três conjuntos distintos representados pelas Formações Barreiras, Tibau e "Pós-Barreiras". Esta última se estende por todo litoral leste cearense e está presente nas classificações de falésias ativas e paleofalésias do estado.

A "Pós-Barreiras" composta de um arenito argiloso, inconsolidados, maciço, de coloração alaranjada é a que predomina nas falésias do litoral leste do Ceará, altamente erosiva, apresentando descontinuidades em seu perfil frontal, que são voçorocas causadas pelo escoamento superficial e erosão subaérea.

Datação por luminescência opticamente estimulada (LOE) utilizando grãos de quartzo mostrou-se eficiente para o estabelecimento da cronologia de depósitos sedimentares que ocorrem sobrejacentes à Formação Barreiras no litoral cearense. Os resultados aqui apresentados indicam que as falésias registraram pelo menos três episódios de sedimentação ocorridos entre o último interglacial e o último máximo glacial no Pleistoceno Superior, ou seja, após milhões de anos da deposição da Formação Barreiras, que ocorreu durante o Mioceno entre 17.5 e 23.75 Ma (LIMA, 2008), podendo ser chamados de depósitos "Pós-Barreiras".

Segundo Rossetti et al. (2013), o processo de sedimentação do Mioceno teria terminado quando o nível do mar baixou. Nesse momento, teria tido início a formação de um horizonte de solo laterítico no topo da Formação Barreiras, que teria durado até o Quaternário. Durante esse período, a maior parte da costa brasileira teria permanecido sem deposição de sedimentos, exposta a erosão subaérea (vento e chuva) e ao desenvolvimento dessa camada laterítica, composta por concreções ferruginosas e grãos de quartzo arredondados. Após a formação dessa camada, teria ocorrido a deposição de sedimentos denominados de Pós-Barreira.

A deposição das falésias no Ceará ocorreu do Pleistoceno tardio até o Holoceno, iniciou no município de Icapuí (extremo leste do Estado) há 95.000 anos, e cerca de 40.000 anos depois foi depositado os sedimentos das falésias de Morro Branco, quase

concomitantemente aos depósitos de Canoa Quebrada, 6.000 anos depois, sendo a mais recente.

Essa diferença de aproximadamente 50.000 anos entre as deposições do "Pós-Barreiras" no Ceará justifica-se pela diferença entre os Estágios Isotópicos Marinhos (EIM). As condições climáticas para que ocorra essa deposição necessitaria de um clima de transição como o clima tropical quente e úmido, com chuvas torrenciais para transportar esse volume de sedimentos para a zona costeira, e que poderia ter sido modelado com as variações do nível do mar.

Com a composição granulométrica e descoberta da origem do material, às falésias cearenses apresentam um maior risco e erodibilidade quando apresentam os depósitos do "Pós-Barreiras" do que quando a Formação Barreiras está atuando.

O estudo possui uma importância além de científica com dados novos, mas também para a comunidade local e turística para a região. A partir dos dados de composição, forma e origem, as áreas de proteção ambiental podem ser criadas com embasamento científico. Preservando essa feição geomorfológica "recente" na escala geológica, porém erosiva, mantendo a paisagem, a forma, o turismo e controlando os riscos de desmoronamentos locais.

O conhecimento geológico de origem deste pacote sedimentar e a característica do sedimento esclarece e detalha uma parte da história geológica da região. Quando conhecemos a história entendemos melhor o presente e nos preparamos para o futuro, um instrumento para a gestão costeira.

7.3 COASTAL SOFT CLIFF EROSION VULNERABILITY ON EQUATORIAL ATLANTIC (NORTHEAST BRAZIL)

ABSTRACT

Coastal cliffs are a morphological feature that has steep slopes and are present in almost half of the world coastal zone. With the increase in anthropogenic occupation on the coast, coupled with events of landslides, this feature may present different levels of vulnerability. This work presents a methodology for calculating vulnerability in soft coastal active cliffs, by adapting the Abuodha and Woodroffe (2010) and Bosom and Jiménez (2011) method. Seven variables, namely (a) lithology, (b) cliff slope, (c) distance to shoreline, (d) shoreline change, (e) coastal defenses, (f) Tide height, (g) Have height were adopted in calculation of the CSI (the square root of the product of the ranked variables divided by the number of variables). To validate the results, the erosion rate of the cliffs at each point was calculated. The location of application of the method was 200 km of coast of soft cliffs on the east coast of Ceará (Northeast Brazil), 578 cliff profiles were analyzed, and 297 active cliff profiles were considered for the results. The methodology developed in the work proved to be efficient to calculate the vulnerability points on the cliffs and can be replicated to any point with active soft cliffs on a national or global scale. The results showed that 80% of the cliffs had high or very high vulnerability. The erosion cliffs hotspots that had a very high vulnerability rating are on the beaches of Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia and Retirinho. The results of this study also provide a framework for government decision making on coastal management in the study region.

Key words: Vulnerability; Soft cliffs; Coastal Sensitivity Index.

7.1 Introduction

Cliffs are a geomorphological feature that presents a flattened top and steep slopes, are present in 52% of the world coast (YOUNG and CARILLI, 2019), 47% in the European coasts (Salman et al., 2004), 41% in the United States coasts (HAMMAR-KLOSE and THIELER, 2001), 40% in Australia coasts (Short and Woodroffe, 2009), 35% of the Arctic coast (LANTUIT et al, 2012) and 60% for Japan coasts (SUNAMURA et al., 2014). The composition varies in soft, rock, limestone and ice cliffs (BIRD, 2008), and can be found inland and in the coastal area.

Coastal cliffs are important geomorphological features because (1) they are sources of sediment for the coastal balance (TRENHAILE, 2016), (2) provide habitat for fauna and flora (Naylor et al., 2012), (3) are tourist areas that drive the economic development of nearby cities, (4) can collapse causing injuries and fatalities (YOUNG, 2018) and (5) are erosive, often threatening coastal communities, infrastructure and

historic sites around the world. These problems are expected to worsen with the increase in global sea level and coastal populations (IPCC, 2014).

This most friable and sandy composition is the most erosive, retreating an average of 23 centimeters per year (PRÉMAILLON et al, 2018), and may vary according to the physical characteristics of the beach. Depending on the level of occupation of these areas, the constant collapse of the cliffs can present risk and vulnerability for coastal areas.

Vulnerability is the state of susceptibility to damage caused by exposure to tensions associated with environmental and social changes and the lack of capacity to adapt (ADGER, 2006). The vulnerability calculation classifies the beach or the cliff profile as very low, low, moderate, high and very high, considering physical variables such as rock type, coastal slope, geomorphology, barrier type, shoreline exposure, shoreline change, relative sea - level rise, mean wave height and mean tide range (ABUODHA and WOODROFFE, 2010; KUMAR et al., 2019), combining a socioeconomic vulnerability (BORUFF et al., 2005) in a Coastal Vulnerability Index (CVI). It provides a framework for coastal managers and planners to prioritize efforts to enhance the resilience or consider adaptation measures in the coastal zone within a study region.

This study uses the term 'sensitivity' in preference to 'vulnerability' to calculate CSI. The distinction is made because the approach assesses only the physical aspects of the coast and not socio-economic variables, such as population. Vulnerability is generally perceived in terms of people being vulnerable to hazards and therefore requires a consideration of socio-economic factors. According to Boruff et al. (2005) in their synthesis of physical and socioeconomic variables, can extend "sensitivity" as a measure of susceptibility to allow it to eliminate vulnerability.

The general objective of this work is to develop a methodology for assessing the vulnerability of active soft cliffs globally and locally and for coastal management of similar coasts, with the specific objective of identifying and characterizing erosive hotspots in current conditions and future scenarios, validating with erosion rate results. In this context, the development and implementation of a methodology based on Abuodha and Woodroffe (2010) and Bosom and Jiménez (2011) are presented. This work will adapt the methodologies used in the sandy beaches mentioned above, due to the lack of work and techniques for calculating vulnerability in cliffs. It is worth mentioning that one methodology does not replace the other but does a first analysis of these cliffs.

The new methodology presented here can deal with the large-scale variability of cliff morphology (578 profiles in 200 kilometers), different lithological compositions and coastal defenses, in an environment with the same climatic and oceanographic characteristics. Despite the lithological variety, the study was focused on soft cliffs in the eastern sector of the state of Ceará, Northeastern Brazil and can be replicated globally in coasts that have cliffs of different compositions.

Cliff vulnerability studies are related to Erosion Hazard (BORUFF et al., 2005), erosion and coastal flooding (Borges et al., 2014), sea-level rise (ABUODHA and WOODROFFE, 2010), ensure a better management of coastal areas (Martins et al., 2012) and descriptive (RODRÍGUEZ GUITIÁN et al., 2020).

Research related to the vulnerability of soft cliffs is recent and scarce due to the increase in occupation and urbanization of the coast with this composition, and Exposure Degree in Spain (DEL RÍO and GARCIA, 2009; SANTOS et al, 2013, DI PAOLA et al., 2018), with studies found in the United Kingdom (BARKWITH et al., 2014a; BARKWITH et al., 2014b). In Brazil, work on the issue of vulnerability addresses the coastal zone (MUEHE, 2010; NICOLODI and PETERMANN, 2010) and not on vulnerability on cliffs.

7.1 Study area

The study area included the active cliffs of the coastal zone of eastern Ceará (Northeast Brazil), a stretch of approximately 200 km shown in figure 30. The coast is classified as sandy, straight with dunes, beaches, cliffs and estuary. The cliffs are sandy, constituted predominantly by reddish and orange sediments of the Barreiras Group formed during the Tertio-Quaternary period (SUGUIO, 2003).

The coastal climate is predominantly of the Tropical Semi-Arid Mid type marked by two defined periods - one dry, long and the other humid, short and irregular (CAMPOS and STUDARTT, 2003).

The waves are N-NE and E-NE, generally varying between 15° and 80° with height varying between 0.60m to 1.10m (PAULA et al., 2016 PINHEIRO et al., 2016), approximately 70% of the waves are sea type, with period (T_p) between 6 and 9s. However, there were still variations in incidence (between 340° and 10°) indicating the entry of waves between N-NW and N-NE that are associated with the occurrence of swell

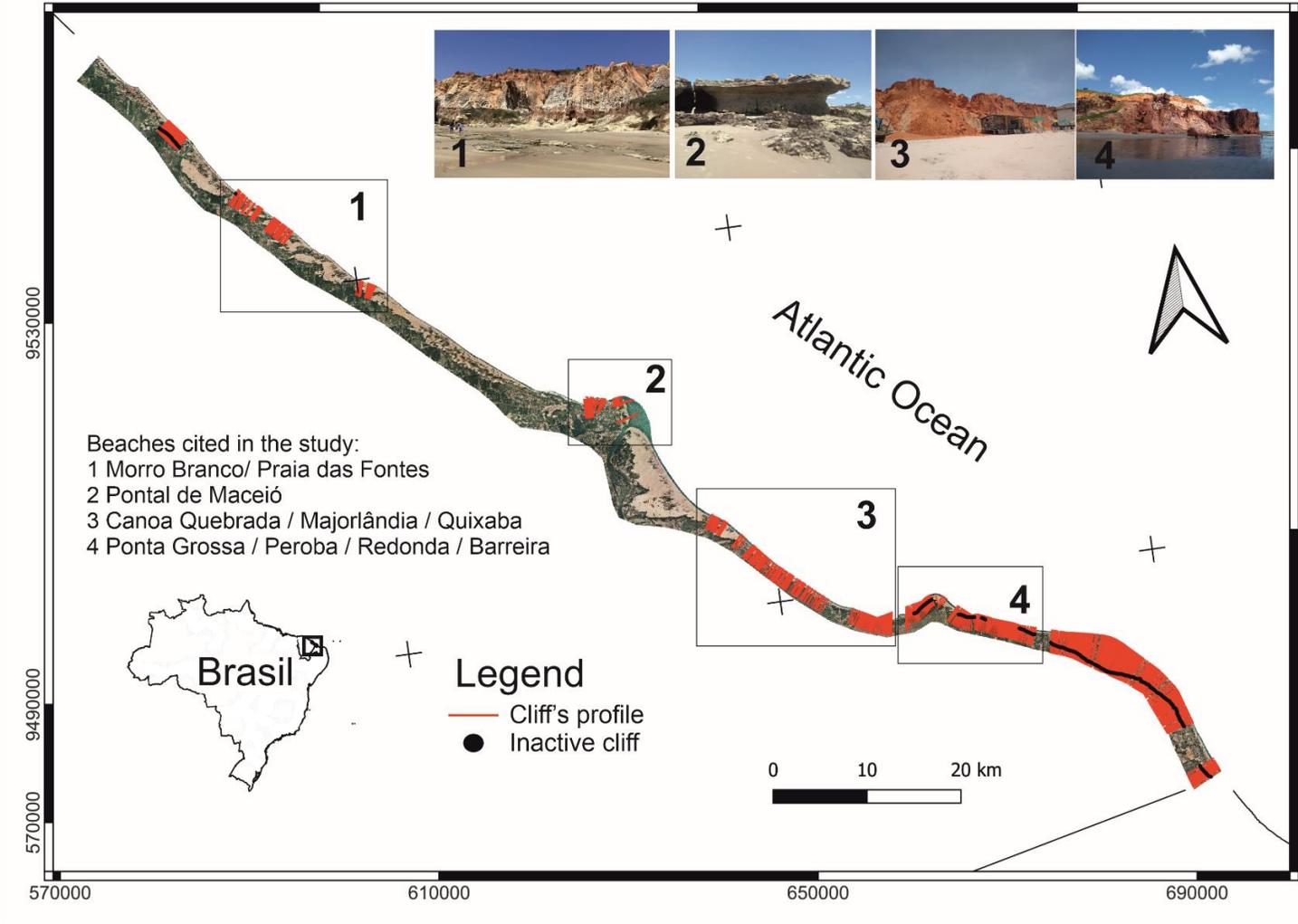
waves in the months between December and April (MORAIS et al., 2006). The tides are semi-diurnal with an average period of 12.4 hours and an average lag of 50 minutes (MORAIS, 1980; Maia, 1998). The height maximum in the spring tides recorded in Ceará is 3.3m, characterizing an environment of meso-tides.

In Brazil, the cliffs occur along almost the entire coastline and extend from the Amazon region, throughout the northern and northeastern coastal region, to the state of Rio de Janeiro (NUNES et al, 2011). They are related to the Barreiras group, are soft cliffs which constitutes a continental and marine terrestrial sedimentary cover (ARAI, 2006), from Miocene to lower Pleistocene age (LIMA, 2008).

The cliffs on the coast of Ceará (Northeastern Brazil) of the municipality of Beberibe constitute the Natural Monument of the Cliffs protected by Decree No. 27.461 of 06/04/2004 and constitute a conservation unit of full protection and use restricted to visitation and landscape contemplation. Another area of cliffs inserted in a Conservation Unit are on the beaches of Canoa Quebrada and Ponta Grossa as an Environmental Protection Area for sustainable use.

The population of the macro-region of the east coast of Ceará, according to the IBGE (2010) consisted of 200,126 inhabitants. It corresponded to a share of 2.26% of the population of the State, which was 8,842,791 inhabitants that same year and a population density of 43.21 inhabitants per km². However, this region is known for the tourism of the cliffs and the hotel offer in the coastal municipalities of the East Coast, according to the surveys of the Secretary of Tourism of Ceará carried out in December 2016, shows Aracati with the largest number of hotels (88) followed by Beberibe (37) and Icapuí (28), but Beberibe has the largest number of dwellings (1,580) and beds (4,764) (SETUR, 2016). Aracati and Beberibe together represent approximately 24.46% of tourist destinations, while the municipality of Icapuí holds 1.56% (SETUR/CE, 2016).

Figura 30- Location of the study area in which the methodology was applied, identifying the profiles, the beaches mentioned in the study and the inactive cliff area in the eastern sector.



Source: Prepared by the author

7.2 Methodology

We calculated the sensitivity of erosion from soft cliffs to the dominant coastal process; in this case, it is marine. In this study, the climatic factor of the rains was not considered, because, according to Emery and Kuhn (1980) subaerial erosion is a smoothing agent of the relief, making it flat. In addition, marine erosive processes are responsible for destabilizing the cliff and subsequent collapse.

The Coastal Sensitivity Index (CSI) is calculated as the square root of the product of seven variables; each variable for each coastal segment was classified from 1 (very low) to 5 (very high) vulnerability according to Table 7 and divided by their total number (equation 1).

Table 9 displays the ranked variables that were mapped, and this section describes the methods used to derive the values that populate the grid template for the structural variables (Lithology, cliff slope, distance to shoreline, shoreline change and coastal defenses) and process variables (Wave height and tide range).

Tabela 9 - Coastal sensitivity index classes created for the Ceará cliff coast. The color scheme depicts the level of sensitivity with blue indicating very low sensitivity while red indicates very high sensitivity.

ID	Variables	Ranking of Coastal Sensitivity Index (CSI)				
		Very low	Low	Moderate	Height	Very height
a	Lithology	Hard rock cliff	Sandstone cliff	-	Sandstone (base) Soft (top)	Soft Cliff
b	Cliff Slope (degrees)	< 10°	10,1° - 14,9°	15° - 22°	22,1° - 39,9°	>40°
c	Distance to shoreline (m)	> 100	80,1 - 99	50,1 - 80	20,1 - 50	< 20
d	Shoreline Change (m/yr-¹)	Accretion	0 - (- 0,25)	(-0,26) - (- 0,5)	(-0,51) - (-0,9)	> (- 1,0)
e	Coastal Defenses	Beach rocks, foredune adjacent to the base cliff (+1m)	Beach rocks in shoreface (0 - 0,9m)	-	Shore Platform (0 - 0,9m)	None
f	Tide range (m)	< 1m (down)	1,1 - 2 (down)	2,1 - 2,4 (up)	2,5 - 2,8 (up)	> 2,9 (up)
g	Wave height (m)	0,2	0,3	0,4 - 0,5	0,6 - 0,9	> 1m
	Erosion cliff's rate (m/yr-¹)	< 0,029	0,03 - 0,1	0,11 - 0,23	0,24 - 0,99	> 1

Source: Adapting the Abuodha and Woodroffe (2010) and Bosom and Jiménez (2011).

$$CSI = \sqrt{(a*b*c*d*e*f*g/7)} \quad (1)$$

Where: a: lithology, b: coastal slope, c: distance cliff base to shoreline, d: shoreline change, e: coastal defenses, f: tide range and g: wave height. Sensitivity has been defined in this study in terms of several semi-quantifiable variables, comprising five structural (a, b, c, d, e) and two process variables (f, g) (Table 9).

Five of the six variables (a, b, d, e, f) have been widely applied in previous coastal vulnerability studies (ABUODHA & WOODROFFE, 2010; Gaki-Papanastassiou et al., 2010; Amin et al., 2019), and can be viewed as conventional variables used to derive similar indices in international studies. The variable coastal defenses (e) and distance to shoreline (c), are new or modified from similar approaches, and have been used in this study for the first time, to evaluate whether they provide further insight into coastal sensitivity.

The mapping of the east coast of Ceará is an area of 200 km where beaches with soft cliffs are predominant. Was carried out using lidar (Light Detection and Ranging) and orthorectified orthophoto images, collected in 2014 acquired at the Ceará State Environmental Superintendence (SEMACE) with scale of 1: 10.000 and spatial resolution of 0.35 meters. Aligned with UTM coordinates, Fuso 24, Southern Hemisphere, and DATUM SIRGAS 2000. The GIS, Global Mapper 20, ArcGIS 10.5 and QGIS 2.18.11 software provided the platforms for coastal mapping.

To display the results of the index, 578 topographic profiles perpendicular to the coast were made in active and inactive cliffs, representing the 184 km of shoreline, with 100 meters each. Similar neighboring profiles were excluded. The data for each profile was extracted from the images of Lidar.

The variable distance to shoreline (c) aims to distinguish active from inactive cliffs. In which most works focus on active cliffs, however inactive cliffs up to 100 meters away from the current coastline were considered for the study. Because when storm events or sea level variations occur, these spots can become active cliffs becoming vulnerable.

For the study of the vulnerability of soft cliffs and the marine actions that cause their erosion and cause their retreat, the data of tides and waves in the most vulnerable category were considered. Thus, we can know in high energy conditions which locations

are most vulnerable. This methodology can be applied on any coast with cliffs where marine actions are superior to sub-aerial actions.

7.2.1 Deriving structural and process variables

Lithology

The lithology variable represents the sedimentary characteristics of deposits on the cliffs, such as color, mineralogical composition and grain size. The Geological Survey of Brazil (CPRM, 2003) interpreted the data for the rock type variable from published geological maps of Ceará on a scale of 1: 500,000, made available. In addition to field expeditions to prove the classification. The interpretation adopts a simplified geological classification of the Barreiras Group, in which old resistant conglomerates (Barreiras Formation) and sedimentary sandstones (Indiviso) are differentiated. Another geological classification is in the Apodi Group with resistant sandstones from the Tibau Formation, classified as Sandstone. Then, according to the lithological composition of the cliff profile, the compositions were subdivided into the four classified types (Table 7).

The Barreiras Formation has a clayey matrix with pockets and / or pebble levels, in most outcrops there are ferruginous portions, lateritic concretions, ages between 23, and 17 Ma (LIMA, 2008). Present in the form of coastal boards in much of the Brazilian coast, from Amapá to Rio de Janeiro (NUNES et al., 2011). With a high degree of cementation, it is classified as a Hard Rock Cliff with very low vulnerability.

The Tibau Formation presents consolidated sandstone rocks, greenish and grayish coloring, of age and lithology coinciding with the Barreiras Formation (CARVALHO NETA, 2007). Because its outcrop in the coastal zone is below the Barreiras Insiviso, it has greater resistance to wave abrasion, however due to its height in the escarpment sedimentary package; it classifies the profile with a high vulnerability. When it appears only, it forms notches and small caves at the base of the cliffs and makes its vulnerability low.

The soft cliffs of Barreiras Indiviso have friable, easily erodible characteristics. Leased quartz pebbles, in addition to orange-colored ferruginous sandstones and claystone's (TATUMI et al., 2008), mark it. In addition, because of its characteristics it is classified as very vulnerable.

Cliff Slope

The slope of the immediate interior is one of the most important factors to be considered in increasing the impact of waves and estimating the increase in sea level on a given coast (NAGESWARA RAO et al. 2008). The cliff slope is directly related to marine erosion at its base, making it steeper and thus more vulnerable (EMERY and KUHN, 1980).

The coastal slope is the generalized topographic gradient of the cliff profile coastal zone that extends from the base line of the cliff inland to the height of the top of the relief. The coastal slope is the generalized topographic gradient of the cliff profile coastal zone that extends from the base line of the cliff inland to the height of the top of the relief. The slope of the immediate interior is one of the most important factors to be considered in increasing the impact of waves and estimating the increase in sea level on a given coast (NAGESWARA RAO et al. 2008). Steep slopes suffer less flooding compared to smooth coasts, and according to Emery and Kuhn (1980) the slope of the cliff is directly related to marine erosion at its base, making it steeper and thus more vulnerable.

The coastal slope is the generalized topographic gradient of the cliff profile coastal zone that extends from the base line of the cliff inland to the height of the top of the relief. Davidson-Arnott (2010) uses the term cliff is used for shorelines with an escarpment angle $> 40^\circ$, being considered the profile of very high vulnerability. The average vulnerability was classified according to the slope of the active cliff profiles, ranging from 15° to 22° . Bird (2008) classifies the softest cliffs, called bluff, with less inclination, varying between 8° and 10° and are considered very low vulnerable (Table 7).

The slope was calculated using ArcGIS Spatial Analyst Extension. The input raster was obtained from using Lidar (Light Detection and Ranging) acquired at the Ceará State Environmental Superintendence (SEMACE). The spatial resolution of 0.35 meters and covered the full extent of the east Ceará coast. The slope output measurement was performed in degrees.

Distance Cliff base to shoreline

To study vulnerability and cliffs to high energy events, it is necessary to separate the classifications of active and inactive cliffs. According Suguio (1998), the active cliffs

are in a constant process of marine erosion in their profile, and the inactive ones this process no longer exists. In addition, the term 'shoreline' was used for the high tide line and 'coastline' for the active cliff line.

This classification is directly related to the distance from the base of the cliff to the current coastline. The shorter this distance, the more vulnerable the cliff profile will be. The distance from the most vulnerable cliffs is less than 20 meters, an area that is easily covered in a storm or high energy event. The distance that has an average vulnerability is between 50 - 80 meters, due to the greater distance found in the profiles. Distances greater than 100 meters were very low vulnerability as they were considered inactive cliffs.

The calculation of the distance from the base of the cliffs to the coastline was made with orthophoto images from 2014, in which a shape line was made at the base of the cliffs and one at the maximum shoreline. With the location of the profiles, it was possible to extract the distance between the two shapefiles. The process was done using ArcGis 10.5 software.

Shoreline Change

The beaches of the Ceará coast have been undergoing extensive erosion processes over the last decades (Pinheiro et al., 2016). This is due to the mild semi-arid climate, geographical position close to the equator, intermittent rivers flowing only during the rainy season and the large number of dams built to supply the population. These factors make the region suitable for coastal erosion. Approximately 30% of the length of the state's coastline is eroded, 17% is erosive, 10% is prograde and 43% is stable (MORAIS et al., 2018).

The shoreline changes variable attempts to capture the historical trend of shoreline movement by determining the general patterns of erosion or accretion that have been derived using remote sensing data. The change in the coast was examined from a series of aerial photography periods between 2004 and 2019, using images available in Google Earth Pro, from the 60 cm resolution Quickbird satellite, in which they were georeferenced and calculated. Both images show high tide levels, the shapefile lines were made from the maximum high tide line. Time series analysis using DSAS (Digital Shoreline Analysis System) software version 5.0, using the End Point Rate (EPR) as a

statistic, which uses the first and last lines for the calculation, an extension of ArcGIS to calculate historical changes on the coast (HIMMELSTOSS et al., 2018).

The classification of rates of shoreline change is shown in Table 1. the classification was based on the average size of the styrene (20 meters) and the average erosion rate for the next 20 years in meters per year. So, when the profile coastline is -1.0 m/yr the vulnerability is very high, between -0.51 and -0.9 m/yr. the vulnerability becomes high, between -0.26 and 0.5 m/yr the vulnerability is fair, and between 0 and -0.25 m/yr the vulnerability is low. When the coastline shows progress, the vulnerability will be very low.

Coastal Defenses

The Coastal Defenses variable is related to natural barriers that prevent or reduce the impact of waves directly at the base of the cliff. These defenses have different shapes and sizes, and therefore different levels of vulnerability, for example, foredunes, beachrocks and shore platforms. Cliff profiles that have no defense are classified as very vulnerable. They were observed and classified through aerial images of Lidar and orthophoto of the year 2014 with spatial resolution of 0.35 meters, in addition to field trips to prove these features.

Some points on the coast have lines of Beachrocks approximately parallel to the coastline formed by sand cemented in calcium carbonate. The presence of submerged rocks changes the beach morpho dynamics, reducing and redistributing the energy of the wave dissipated on the coast (COOPER, 1991). They behave like "Barriers" that generate bay, with deposition in the areas protected by the Beachrocks and marked erosion in the areas where these rocks are interrupted. Its thickness varies from a few centimeters to more than 2.5 m. Thus, the profile that presents rocks over 1m thick adjacent to the cliffs was classified as very low vulnerability. With thickness less than one meter, they were classified as moderate vulnerability, because there is a defense, but it does not fully protect.

Another feature on the coast that protects the cliffs is the abrasion platforms. They are a geomorphological feature formed by the erosion of the upper package of the cliffs. This occurs when a cliff has two compositions, a lower one more resistant and an upper one more erosive. Over time, the upper layer is removed, and the lower layer remains on the beach, forming the abrasion platforms. They are resistant and protect the cliffs, as

they dissipate wave energy and force waves to break in the sea, thus reducing the number and energy of the waves that reach the base of the cliff. The presence of a shore platform beneath a thin veneer of sand is thought to potentially provide protection to cliffs (TRENHAILE, 2016). In this study they were classified as varying between moderate and high vulnerability, according to their size and thickness. Most abrasion platforms are a few centimeters in a flat area, and these have been classified as high vulnerability.

Another coastal defense is the frontal dunes that are the accumulation of sediments at the base of the cliff carried by the wind. The front dunes are mountain ranges, sands built on the back of a beach, where the dunes have been colonized with vegetation, and trap the blown sand creating a protected environment in which the blown sand is deposited (BIRD, 2008). Profiles presenting this coastal defense at the base of the cliff were classified as very low vulnerability.

Tide range

The tide forecast data was obtained from the tide table of the Brazilian Navy in two harbors, located at each end of the study area. Due to the extensive area, the data of the two harbors was necessary. The harbor of Mucuripe onshore located in Fortaleza (Capital of Ceará) west of the study area, and at the harbor of Termisa offshore, located in the city of Areia Branca (State Rio Grande do Norte), east of the study area. The data for the harbor of Mucuripe were obtained from 2011 to 2018, with data four times a day. The harbor of Termisa data for 2015 and 2019.

Wave Height

Oceanographic wave forecast data was extracted from the Surf guru platform using the Wavewach III model. The data correspond to height, period, direction, power and energy in the surf zone every three hours, in the period between May 2016 and April 2020 on every beach that has cliffs. The data were necessary for the knowledge of the local hydrodynamics in each region, if there would be changes within the study area.

In total 12 analyzed beaches were spaced across the study area. They are Praia das Fontes, Morro Branco, Uruaú, Paraíso, Parajuru, Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia, Ponta Grossa, Redonda, Peroba and Tremembé.

7.3.1 Method validation

The rates of erosion or retreat of the cliff result from a combination of processes analyzed in the CSI and occur in a non-linear manner after long periods of apparent stability, indicating that each point has its specific characteristics and distinct erosion rate. Therefore, erosion rates in the same area and in the same period analyzed (2004 - 2019) were considered essential as a spatial indicator of cliff susceptibility areas and were used to validate the proposed method.

Records of the cliff-top lines on each beach (totaling 20 beaches on a scale of 1:15000 each, some using image files so as not to lose resolution). Was examined from a series of aerial photography periods between 2004 and 2019, using images available in Google Earth Pro, from the 60 cm resolution Quickbird satellite, in which they were georeferenced and calculated. Time series analysis using DSAS (Digital Shoreline Analysis System) software version 5.0, using the End Point Rate (EPR) as a statistic, which uses the first and last lines for the calculation, an extension of ArcGIS to calculate historical changes on the coast (HIMMELSTOSS et al., 2018).

The very low to very high vulnerability rating was based on studies of world cliffs by Prémaillon et al., (2018), in which Median erosion rates are 2.9 cm/yr⁻¹ for hard rocks, 10cm/yr⁻¹ for medium rocks and 23 cm/yr⁻¹ for weak rocks. From this study, the erosion rate for each level of vulnerability was classified in Table 1, and very high vulnerability was rates greater than 1 m/yr⁻¹.

7.3 Results

7.3.1 Morphological settings

The results of the 578 topographic profiles perpendicular to the coast were 281 profiles on inactive cliffs (48.8%) and 297 profiles (51.2%) on active or inactive cliffs distant up to 100 meters from the coast without physical barriers obstructing their base. The study was calculated based on the active cliffs, as they are the ones that have real vulnerability indices. Inactive cliffs more than 100 meters from the coast or with obstacles at their foot do not present real vulnerability. Even when all variables indicate a high vulnerability, even with future variations in sea level, the tide level and the impact of the waves do not cause changes in its profile.

The lithology in soft cliffs is very height vulnerable in 94 points (31.6%); cliffs more resistant sandstone base and soft cliff top in 139 points (46.8%) and resistant cliffs (21.5%), representing cliffs with low and very low vulnerability presented in table 2. Moreover, the cliff slope indicated that 140 points (47%) was above 20.1° classified with high or very high vulnerability. Regarding the shoreline change, despite the conditions favorable to coastal erosion, in 182 points (61%) it presented low or very low vulnerability (Table 8).

The distance to shoreline shows that in 99 points (33.3%) of the active cliffs are less than 20 meters from the coastline and in 161 points (54.2%) are less than 50 meters, classified as very high and high vulnerability. Due to the local tide being classified as mesotidal, with a variation of 2-4 meters, these cliffs become highly exposed with the strongest wave action being exposed in high-energy events, swell, equinoctial tide and spring tides. At some points on the beaches of Morro Branco, Praia das Fontes and Pontal de Maceió (Beaches 1, 2 and 4 indicated in Figure 1), the distance is zero when the tide is rising and at its maximum peak. The average value of the distance to shoreline is 27 meters.

In relation to inactive ones, a maximum distance value of 100 meters without anthropic barriers was stipulated. Thus, we can know the vulnerability of these points to extreme events or sea level rise. These points are located on the beaches of Morro Branco (average of 55 m), Quixaba (average of 31.4 m), Redonda (average of 39 m), Peroba (average of 39 m) and Barreira (average of 47 m), and their results alternated at points with moderate and high vulnerability.

High-energy events are considered waves greater than 1 meter plus a tide greater than 2.8 meters. This occurs cyclically due to the presence of a *swell* off the coast of Ceará in the months from January to March, and in September. It can be observed by the wave period data, which exceeds 15 seconds. The maximum wave height recorded was on March 2, 2018, with a wave height of 1.9 meters and a tide of 3.8 meters.

Even though most of the cliffs have a short distance to the shoreline, the variation of this line in the last 15 years showed an accretion rate of 87 points (29.9%), classified as very low vulnerability. In 95 points (31.9%) an erosion rate of 0.25 m/yr, classified as low vulnerability. The 82 points with high and very high vulnerability (27.6%) are located on the beaches of Praia as Fontes, Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Retirinho, Peroba and Barreira (Beaches 2, 4, 5, 8, 10 and 11, indicated in Figure 31).

Tabela 10- Result in percentage of active and inactive cliffs (distant to 100 meters from the current shoreline free of anthropic barriers), according to the vulnerability classification of the variables. Result in percentage the CSI (Coastal Sensitivity Index) and the erosion rate cliff's top in the period 2004-2019.

RESULTS ACTIVE CLIFFS (%)					
Variables	Very low	Low	Moderate	Height	Very height
Litology	19,87 %	1,68 %	-	46,8 %	31,65 %
Cliff Slope	17,17 %	14,48 %	21,21 %	40,07 %	7,07 %
Distance shoreline	0,34 %	1,01 %	11,11 %	54,21 %	33,33 %
Shoreline Change	29,29 %	31,99 %	11,11 %	16,16 %	11,45 %
Coastal Defenses	4,04 %	8,42 %	3,03 %	4,04 %	80,47 %
CSI	0,34 %	1,01 %	17,17 %	55,56 %	25,93 %
Erosion Cliff's Rate	71,38 %	2,69 %	7,41 %	13,47 %	5,05 %

Source: Prepared by the author

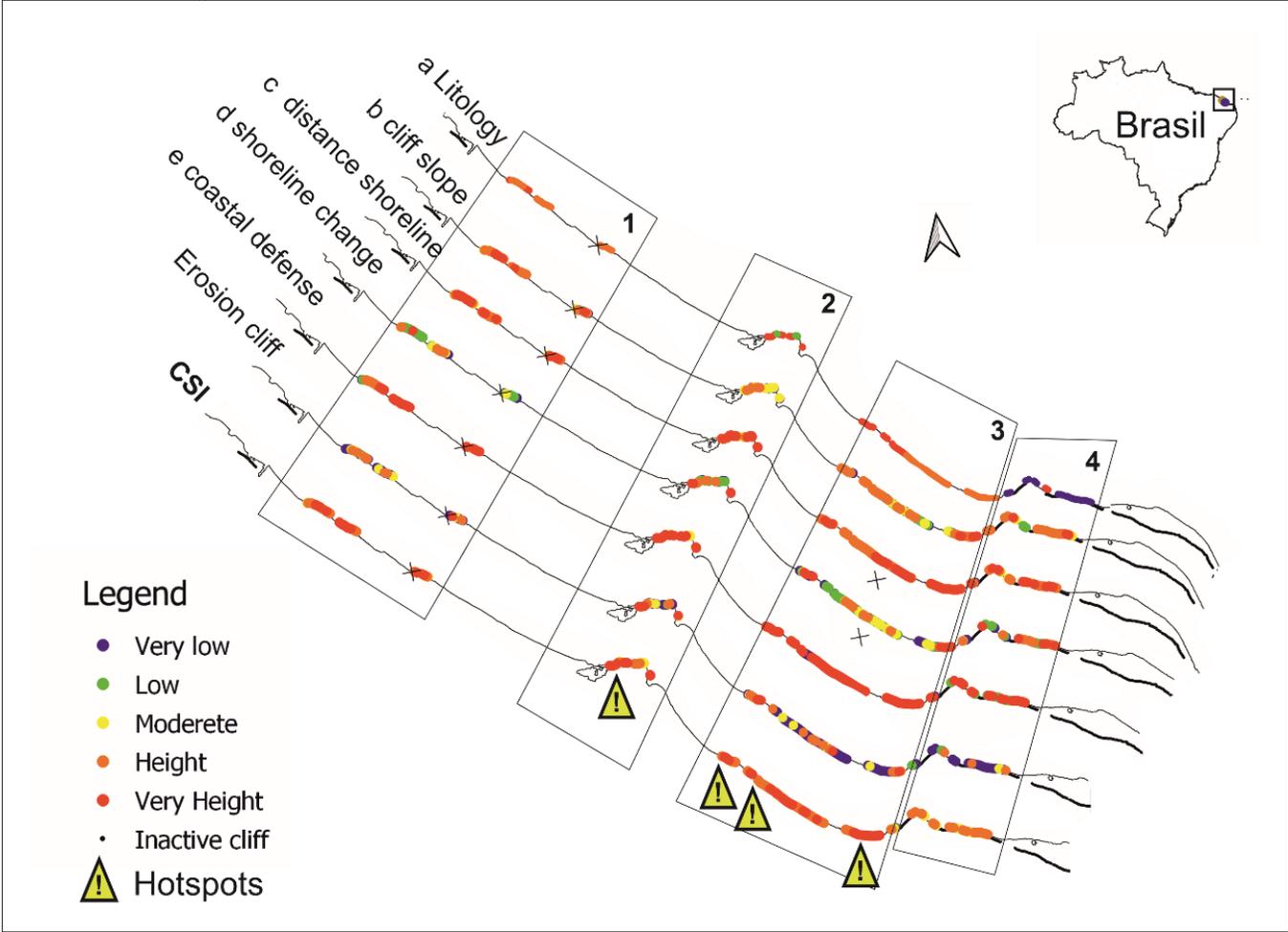
In 37 points (12.4%) does it have any coastal defenses, such as frontal dunes, beach rocks and abrasion platforms greater than one meter. These areas are on the beaches of Morro Branco, Quixaba, Peroba and Barreira. The coastal defense is important to stop tidal actions and wave forces. However, most of the cliffs on the east coast of Ceará will not have coastal defenses in 239 points (80.4%), as can be seen in table 10.

7.3.2 Coastal Sensitivity Index (CSI)

The analysis and classification of the variables, it was possible to obtain the value of the Coastal Sensitivity Index (CSI), which showed the cliffs at 77 points (25.9%) at very high vulnerability and at 165 points (55.5%) at high vulnerability. Showing that the environmental conditions of these cliffs at this location on the coast are vulnerable.

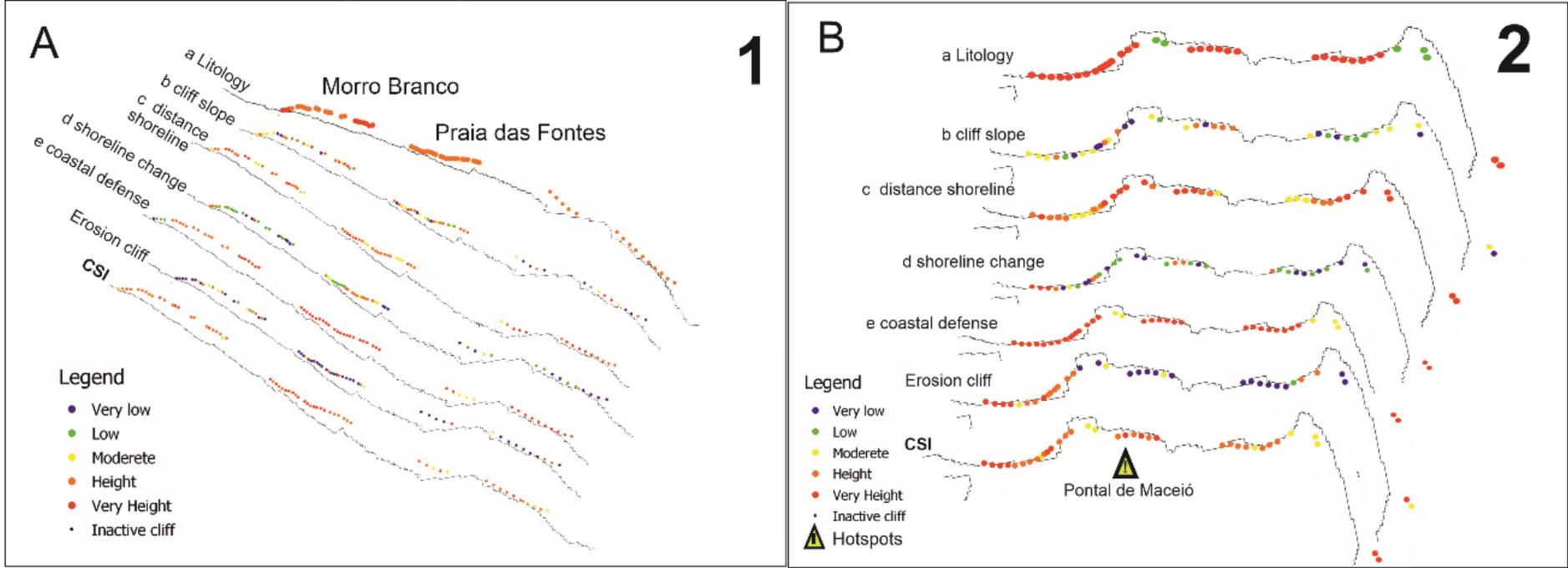
The erosion rates of the top of the cliffs were calculated in the last 15 years, and the result was that in 212 points (71.3%) the erosion was between 0 and 0.029 m/yr. Although most points have a low erosion rate, at 40 points (13.4%), the vulnerability was high and the rate varied between 0.24 and 1 m/yr, and the points with a rate greater than 1 m/yr were in 15 points (5%) on the beaches of Pontal de Maceió and Canoa Quebrada. Indicating that these are the points that present the greatest vulnerability and deserve attention from public policies for coastal management.

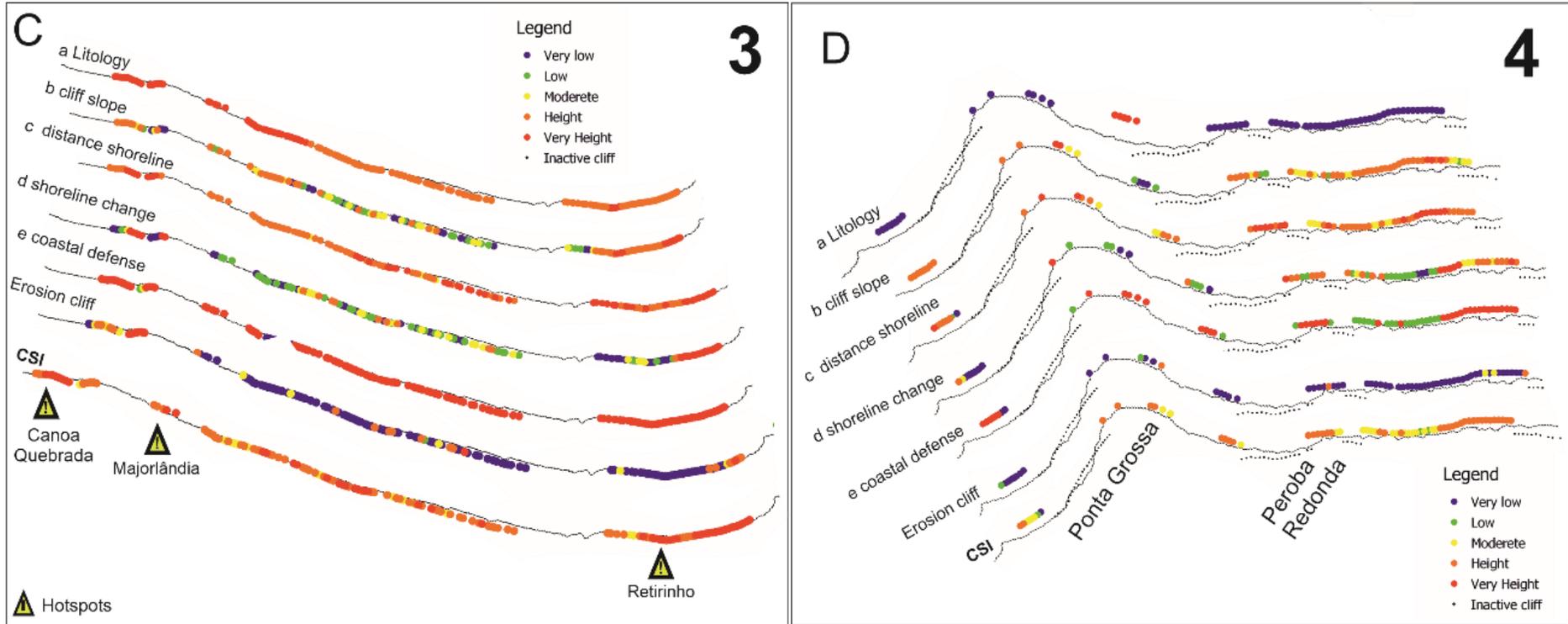
Figura 31- Result of the vulnerability of the variables a) Litology, b) Cliff Slope, c) Distance Shoreline, d) Shoreline change and e) Coastal Defenses. The points were classified as very low (Blue), low (Green), moderate (Yellow), high (Orange) and very high (Red). In addition, dunes, rivers and cities were identified in the image, in areas that did not have cliffs). Showing the erosion cliffs hotspots.



Source: Prepared by the author.

Figura 32 – Map of the separated variables in the 4 zones of the east coast of Ceará (A1 Morro Branco/Praia das Fontes, B2 Pontal de Maceió, C3 Aracati-Canoa Quebrada and D4 Icapuí), showing the results of the variables a Lithology, b cliff slope, c distance to shoreline, shoreline change, and Coastal Defenses, Coastal Sensitivity Index (CSI) and cliff erosion rate according to vulnerability level, very low (blue), low (green), moderate (yellow), high (orange) and very high (red). Showing the cliff erosion hotspots on the beaches of Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia and Retirinho.





Source: Prepared by the author.

Figure 31 and 32 shows the map of the location and classification of the vulnerability of the points on the active cliffs of the variables Lithology, Cliff slope, Distance Shoreline, Shoreline change and Coastal Defenses. In addition, it is possible to observe the points of the inactive cliffs, located predominantly on the eastern end of the coast. Fields of fixed and mobile dunes, rivers Parajuru and Jaguaribe, as well as cities that are at the top, or very close, of the active cliffs occupy the areas that do not have cliffs. The variables were presented as independent and when added together they indicate the places with the greatest vulnerabilities. With the Coastal Defenses and Lithology variables having the highest vulnerability. The variables Cliff Slope and Distance Shoreline showed high vulnerability.

7.4 Discussion

The east coast of Ceará presents active cliffs (51.2%) located in the western sector of the study area, and inactive cliffs (48.8%) present mainly in the extreme east sector of the study area (SILVA, et al., 2020). They are distinguished in active and inactive due to physiography (orientation, height, for example), marine action plus sea level variation in the holocene in the region of the extreme east of the State (BEZERRA et al, 2003), starting at the beach of Ponta Grossa (Icapuí) and going until the border with the state of Rio Grande do Norte. The quantification in kilometers was done by Rodrigues da Silva et al., (2020) who accounted for 73.83 km of cliffs on the coast, totaling 36.7 km of active cliffs and 39.64 km of inactive ones, called by the study of paleocliffs.

The presence of soft cliffs predominantly on the east coast of Ceará is related to the sedimentary deposits of the Potiguar Basin in Tertio-Quaternary (LIMA, 2008). The neotectonic forces in the region explains the double composition of the sedimentary package of these cliffs, which has a more resistant base made up of the Barreiras Formation (up to 30 meters) and the top by the Barreiras Indiviso Formation, soft cliffs. In addition, in the region of the beach near the foot cliffs in the extreme east sector, a punctual carbonate platform corresponds to the Jandaíra Formation in which they were deposited in the Cretaceous period, estimated between 80 to 90 million years (Lima, 2008). The coastal sandstones of the Tibau Formation (Cenozoic age), whose age ranges from the Neocampanian to the Neogenou, are characterized by medium to thick sandstones and predominate laterally and vertically along the cliffs (SOUSA et al., 2009).

Regarding the cliff slope of the profile of the active cliffs, more than half of the profiles (61%) showed declivity with low or very low vulnerability. This means that in these points in date of Lidar image, marine action was not the dominant factor, not excluding the fact that morphological profiles controlled by environmental processes, such as marine and climatic, remain constant. The results show that the most vulnerable points of the coast in this respect are spatialized throughout the coast with active cliffs, interspersed points with low or very low vulnerability. These points are on the beaches of Uruaú, Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Fontainha and Redonda.

The calculation of the profile considered it as a straight line between the foot and the top of the cliff, not distinguishing the vertical cuts near the top, the scars of past collapses and the notches at its base. A general estimate does not differentiate between concave and convex profiles, the calculation of the angle of the tangent of that distance. According to Rodrigues da Silva et al., (2020) who performed the exact calculations of the profiles of the active cliffs in the same region, it was observed that the upper half of the profile the angle varies between 50° and 70°, and the lower half is more smoothed with angles between 20° and 30°, indicating scars from past landslides.

The cliffs that have double lithology in their profile, with the lower part more resistant than the upper one, leave in the beach sector past erosion marks, the shore platforms, observed in figure 33-a. Although almost half of the cliffs (46.8%) have this composition, the plane abrasion platforms are not sufficient to protect the base of the cliffs. At some points it can change the shape of the open coast for small headlands, and the wave direction, making the adjacent cliffs more vulnerable.

Beachrocks and foredunes are the most efficient coastal defenses when it comes to cliff protection. The study showed that the only point on the east coast of Ceará that has beachrocks adjacent to the cliffs is on the beach of Canoa Quebrada. This formation has a height of more than 1 meter and is in the region of protecting two cliff profiles, then they go parallel to the coast but to the submerged region, being exposed at low tide and totally submerged at high tide, losing its protection function and leaving the cliffs more exposed.

The presence of foredunes for coastal defenses is of vital importance for coastal cliffs as shown by Arens and Wiersma (1994). In the cliff profile shown in figure 33 it is possible to identify the presence of foredunes with vegetation fixing the sediments, indicating a point of low vulnerability. In addition to this variable, the profile also

indicates variables such as hard rock cliff lithology, distance to shoreline and shoreline change adding to the coastal defense of foredunes.

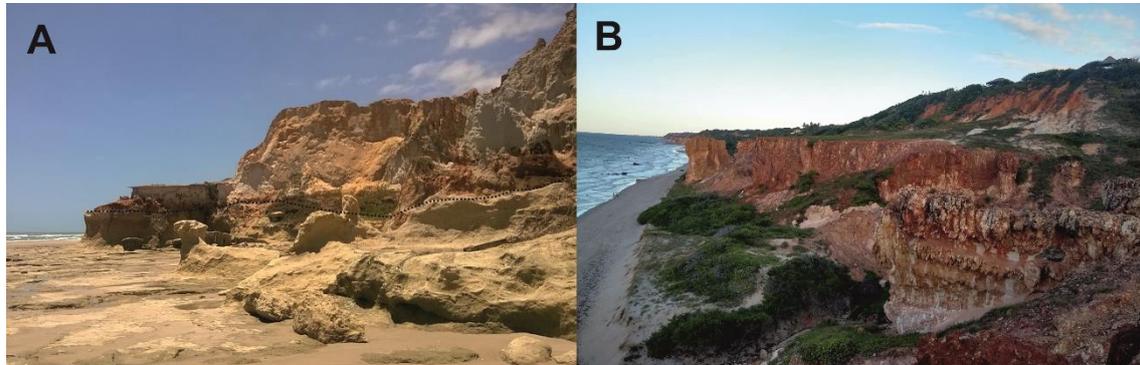
The rates of coastal erosion in the study area were presented by Morais et al (2018), they state that the coast of the State has been undergoing extensive erosive processes over the last few decades, with approximately 39% of the length of the State's coastline showing erosion, 19% erosive tendency, 9% are areas with progradation and 33% showing tendency to stability. The points indicated with erosion are the same as those with a very high CSI except for the municipality of Icapuí, they are Morro Branco, Praia das Fontes, Pontal de Maceió, Canoa Quebrada and Retirinho.

The cliff areas with low and moderate vulnerabilities are in the easternmost sector of the study area, just before the start of the inactive cliffs with distances greater than 100 meters from the coastline. The result is justified due to the composition of the cliffs in this zone being hard rock cliff's, confirmed by the erosion rate, which has very low vulnerability results.

Coastal Sensitivity Index results can be validated with the rate of erosion of the cliffs because the cliffs profiles that showed very high vulnerability are the same places where the erosion rate exceeds 1 m/yr.

Although the vulnerability was high or very high in most of the points (81.4 %) and the erosion rate in the last 15 years (2004-2019) is low because the shoreline is the most dynamic component of the cliff erosion (TEREFENKO et al., 2019). It is worth mentioning that this vulnerability to height energy events occurs quickly and in a short time. The cliff top erosion rate was generally low, but according to the worldwide study of cliff erosion rate (GlobR2C2 - Global Recession Rates of Coastal Cliffs) by Prémaillon et al., (2018), the Ceará's soft cliffs are within the world average erosion rate of up to 0.23 cm/yr. The beaches that showed a very high vulnerability and an erosion rate above 1 m/yr, which are hot spots of erosion. These sites are: Pontal de Maceió (maximum of 5.59 m/yr), Canoa Quebrada (maximum of 3.95 m/yr) and Retirinho (maximum of 2.47 m/yr), which are located near promontories, areas in which, according to Carter et al (1990), the potential for erosion is maximized in the promontories.

Figura 33- (a) An example of a high vulnerability cliff composed of a consolidated sandstone base and upper semi-consolidated package, exposing a shore platform on the beach of Morro Branco (Tibau formation at the base and Barreiras Indiviso at the top). (b) An example of a profile with low vulnerability coast composed of conglomerates resistant sediments, on the beach of Peroba, Icapuí (Barreiras Formation at the base and Barreiras Indiviso at the top). With the presence of foredunes at the foot cliffs as coastal defenses.



Source: Prepared by the author.

The California coast is exposed to waves generated by local winds, the mean soft cliff top retreat rate was 0.12 m/yr and the maximum cliff top were 4.2 (Young, 2018), in the Poland have erosion median was only 0.03 m/yr (TEREFENKO et al., 2019), and in UK the mean soft cliff recession rate increased from 3 m/yr (1883–1947) to 5 m/yr (1992–2008) (BROOKS and SPENCER, 2010).

The collapse of cliff blocks occurs after some time of the wave action at its base, and before that it leaves a form, called noch, indicating a risk area before the collapse. Soft cliffs have a higher erosion rate (PRÉMAILLON et al., 2018), but this does not mean that there are no landslides in cliffs in heavily cemented sandstones (Figure 34-a). This event occurs more quickly and due to the height of the sedimentary package, these points make its vulnerability height.

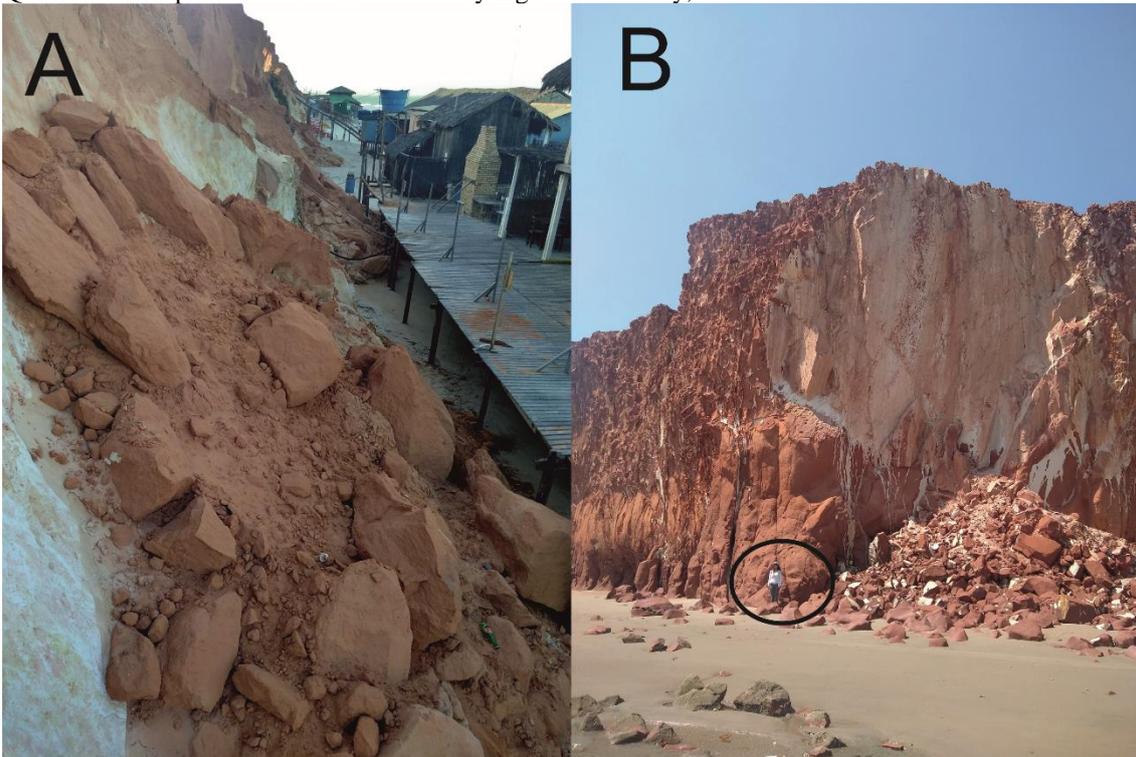
The most critical and vulnerable areas are on the beaches of Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia and Retirinho. The beach of Pontal de Maceió has cliff profiles with very height vulnerability, these hot spots of erosion are justified by the location of the beach being on the left bank of the mouth of the Jaguaribe River, the largest river in the State. Studies on erosion in this area have been carried out by Morais et al (2008) and Duarte (2018).

Similar studies such as the assessment of coastal vulnerability and degree of exposure of the Island of Gran Canaria (Spain) focusing on the coastal risk of Las Canteras Beach in Las Palmas de Gran Canaria by Di Paola et al., (2017) highlighted significant differences in the levels of vulnerability (CVI) and exposure (Ex) along the coast of the Island that separate the east (northeast to southwest) from the west coast

(southwest to northeast). Identifying that the vulnerability does not occur throughout the region, but at specific points according to the characteristics of the beach.

Among these areas, the beaches of Canoa Quebrada and Majorlândia are the most critical because they have very high lithology, distance to shoreline, shoreline change and coastal defenses, in addition to having a high degree of occupation on the top of the cliffs, due to their tourist potential. Among them, the Canoa Quebrada beach is the most explored with increasing real estate speculation for the construction of inns, hotels, restaurants and bars. This growth occurs in areas of cliff tops and in fixed and mobile dunes. According to Rodrigues da Silva (2017) the growth went from 0.16 km² in 1980 to 1.04 km² in 2016, and 0.1 km² are in a risk area less than 100 meters from the top of the sandy cliffs. The landslides caused by marine forcers at its base are in tourist areas with the presence of beach huts and a large flow of people, as can be seen in figure 34-b.

Figura 34- A- Collapsing blocks in sandstone cliffs more resistant composition in beach Redonda, Icapuí. This point was classified as high vulnerability. B- An example of the collapse points of semi-consolidated sediments from the top of the cliff caused by continuous marine actions at its base, on the beach of Canoa Quebrada. This point was classified as a very high vulnerability, the most critical zone.



Source: Prepared by the author.

7.5 Conclusion

The methodology developed in the work proved to be efficient to calculate the vulnerability points on the cliffs and can be replicated to any point with active soft cliffs. The validation of the results with data on the erosion rates of the cliffs and with other studies on the coastal erosion rate was satisfactory and proved the veracity of the erosive hotspots.

The erosion cliffs hotspots that had a very high vulnerability rating are on the beaches of Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia and Retirinho. Among these, the beaches of Canoa Quebrada and Majorlândia stand out due to the high concentration of tourists and users close to the cliff foot and possible landslides. And future scenarios were observed on inactive cliffs with less than 100 meters without barriers on your foot, they were classified as moderate and high vulnerability.

In addition to the erosion's hotspots, the active soft cliffs on the east coast of Ceará showed 80% high or very high vulnerability, indicating that the lithology added to other physical factors and high energy events highlight these points for coastal management actions.

Considering the high economic and environmental value of the investigated study area, its integrated management, considering the real socioeconomic values and their aspects of near future development, coastal vulnerability and risk, is of great importance.

In this context, the rich GIS database produced during the present study, including environmental and statistical data, elaborate indexes and a series of linked thematic maps, it can, notably, support new studies, as well as future interventions aimed at mitigating coastal risk and sustainable development of the Brazilian coast.

CAPÍTULO V - RECOMENDAÇÕES

Os estudos em falésias no Brasil ainda são escassos e essas são vistas mais como potencial turístico do que áreas de risco. Ainda é possível ver cidades e áreas urbanas se multiplicando próxima a essa feição sem um devido controle governamental e ambiental.

Artigos mapeando as falésias mundiais como de Young e Carilli (2019) citam que as falésias brasileiras são indocumentadas. Reconhecem a existência, porém não possuem dados suficientes para mapeá-las. Parte disso é devido aos trabalhos não alcançarem níveis mundiais por grande parte de sua publicação ser em português e em revistas de baixo impacto. Entendo que a escrita em inglês é um desafio quando falamos de sistema educacional brasileiro, porém é de extrema importância a criação de projetos nas universidades incentivando e ajudando seus alunos e pesquisadores a publicar trabalhos em revistas internacionais.

Neste trabalho foi explorado as falésias do leste do Ceará em português e inglês, porém entender a erodibilidade dessas falésias a nível geotécnica para alimentar um novo modelo futuro que possa migrar com um modelo antigo. Porque apesar de serem falésias similares e replicabilidade da metodologia, cada região possui suas particularidades de clima e litoestratigrafia, que deve ser estudada minuciosamente.

Por isso, recomendo estudos de assinatura de erodibilidade, análises de permeabilidade, porosidade, laterização, faturamento, entre outros causas do desmoronamento, a parte estrutural, fratura lixiviada e como os blocos estão colapsando do topo para a base em falésias no futuro porque é importante entender como as camadas dessa se comportam e por quê. Projetos como “Diagnóstico e apontamentos de medidas mitigadoras para o contexto de riscos nas falésias de Pipa e Barra de Tabatinga” (AMORIM, 2021) é um dos caminhos para seguir com o estudo de falésias da costa do Ceará também.

É necessário que esses e futuros trabalhos entrem para a literatura científica mundial ao mesmo tempo converse com a população local, usuários, poder público e gestão costeira. Para que juntos possam entender como se comportam essas falésias atrelada aos fatores ambientais que as modelam e mitigar possíveis danos aos usuários.

Com os resultados e conclusões dessa tese, a recomendação é que o poder público tome conhecimento e atitudes para as praias de maior vulnerabilidade, fiscalize as atividades antrópicas e gestione a especulação imobiliária nessas áreas respeitando o meio ambiente e as zonas de risco.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES GERAIS

Com os dados apresentados foi feito uma correção e atualização dos dados apresentados foi feito uma correção e atualização dos dados sobre as falésias arenosas friáveis do Ceará estão associadas principalmente aos Depósitos "Pós-Barreiras" e Formação Tibau, que se concentram no litoral leste indicando o início da Bacia Potiguar. As paleofalésias mapeadas indicam a variação do nível do mar na região em três localidades, como verificado um recuo de regresso variável de 1200 m (Cascavel) a 3200 m (Icapuí).

A deposição e origem do material das falésias do litoral leste do Ceará são diferentes dos sedimentos da Formação Barreiras, de origem Miocênica. Sua origem é terrígena devido a sua composição geoquímica (72% de Si e 13% de Al) e seu transporte está associado ao fluvial. Os estudos comparativos deste sistema deposicional permitiram correlacioná-los aos depósitos areno argilosos, maciços, afossilíferos, de coloração avermelhada depositados no sistema deposicional de leque aluvial distal da Formação Barreiras.

A seção estratigráfica das falésias estudadas mostra três conjuntos distintos representados pelas Formações Barreiras, Tibau e "Pós-Barreiras". Esta última se estende por todo litoral leste cearense e está presente nas classificações de falésias ativas e paleofalésias do estado. A "Pós-Barreiras" composta de um arenito argiloso, inconsolidados, maciço, de coloração alaranjada é a que predomina nas falésias do litoral leste do Ceará, altamente erosiva, apresentando descontinuidades em seu perfil frontal, que são voçorocas causadas pelo escoamento superficial e erosão subaérea.

A deposição desses pacotes sedimentares ocorreu no Pleistoceno Superior, ou seja, após milhões de anos da deposição da Formação Barreiras, que ocorreu durante o Mioceno entre 17,5 e 23,75 Ma (LIMA, 2008), podendo ser chamados de depósitos "Pós-Barreiras".

A deposição das falésias de Icapuí ocorreram primeiro há 95.000 anos, e cerca de 40.000 anos depois foi depositado os sedimentos das falésias de Morro Branco e 6.000 anos depois das falésias de Canoa Quebrada, sendo a mais recente. Essa diferença de aproximadamente 50.000 anos entre as deposições do "Pós-Barreiras" no Ceará justifica-se pela diferença entre os Estágios Isotópicos Marinhas (EIM). As condições climáticas para que ocorra essa deposição necessitaria de um clima tropical quente e úmido, com

chuvas torrenciais para transportar esse volume de sedimentos para a zona costeira, e que foi modelado com as variações do nível do mar.

A metodologia desenvolvida no trabalho mostrou-se eficiente para calcular os pontos de vulnerabilidade nas falésias a eventos de alta energia, podendo ser replicada em qualquer ponto com falésias arenosas ativas. A validação dos resultados com dados sobre as taxas de erosão das falésias e comparados a outros estudos sobre a taxa de erosão costeira foi satisfatória e comprovou a veracidade dos *hotspots* erosivos.

Além dos *hotspots* de erosão, as falésias arenosas ativas na costa leste do Ceará apresentaram 80% de vulnerabilidade alta ou muito alta, indicando que a litologia somada a outros fatores físicos e eventos de alta energia destaca esses pontos para ações de manejo costeiro. Todas as falésias mapeadas (ativas e inativas) demonstram uma erosão subárea atuante, representada por voçorocas que variam seu tamanho de poucos metros até 201 metros, que estão presentes em todas as falésias que não estão cobertas por vegetação.

Os focos de erosão das falésias que apresentaram classificação de vulnerabilidade altíssima estão nas praias de Pontal de Maceió, Canoa Quebrada, Majorlândia e Retirinho. Dentre elas, as praias de Canoa Quebrada e Majorlândia se destacam pela alta concentração de turistas e usuários próximo ao sopé da falésia e possíveis deslizamentos. Além disso, cenários futuros de vulnerabilidade foram observados em falésias inativas com distância inferior a 100 metros sem barreiras na base, eles foram classificados como de média e alta vulnerabilidade.

Em um total de 73 quilômetros de linha de falésias ativas e inativas no litoral leste do Ceará, apenas um trecho de três quilômetros possui uma área de proteção ambiental integral atuando, impedindo novas ocupações irregulares na área. Apenas 4% das falésias possuem uma proteção ambiental efetiva, com isso, os dados apresentados alertam aos gestores públicos os pontos que demandam mais atenção.

REFERÊNCIAS

- ABUODHA, J. O. Z. Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya, **Journal of African Earth Sciences**, v. 36, n. 1-2, p. 41-54, 2003.
- ABUODHA, P.A.O.; WOODROFFE, C.D. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. **J Coast Conserv**, vol 14, 189–205, 2010.
- ADGER, W.N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, p. 268–281. 2006.
- AITKEN, M.J.; STOKES, S. **Chronometric dating in archaeology**. Chapter January 1997.
- ALBUQUERQUE, F.N.B. Impactos Ambientais e Agentes/Fatores Controladores de Voçorocas Urbanas na Cidade de Eunápolis (Bahia). **Revista Eletrônica Multidisciplinar Pindorama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA**. Nº 02 – Ano 3. 2012.
- AMORIM, R.F. **Diagnóstico e apontamentos de medidas mitigadoras para o contexto de riscos nas falésias de Pipa e Barra de Tabatinga - RN** / Rodrigo de Freitas Amorim; Rubson Pinheiro Maia (coordenadores). - Natal, 2021. 225f.: il.
- AMIN, M.; SEBAYANG, I.S.D.; SITOMPUL, C.M. Coastal Vulnerability Index Analysis in the Anyer Beach Serang District, Banten. **SINERGI** Vol. 23, No. 1, February 2019.
- ARACATI, Lei no 40, de 20 de março de 1998. **Dispõe sobre a regulamentação da lei no 01/97 que determina o limite da área de preservação ambiental e paisagístico da zona costeira do município**. Diário Oficial do Município de Aracati, 1998.
- ARAI, M. A Grande Elevação Eustática do Mioceno e Sua Influência na Origem do Grupo Barreiras. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.
- ARAI, M. A Grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.
- ARENS, S.M.; WIERSMA, J. The Dutch Foredunes: Inventory and Classification. **Journal of Coastal Research**, Vol. 10, No. 1, 1994.
- ASSAD, L. As belas e perigosas construções da natureza. **Cienc. Culto**, São Paulo, v. 62, n. 2, pág. 06-08, 2010.
- AZEVEDO, R.S. **Diversidade biológica de peixes nas pescarias em recifes artificiais instalados na Praia de Canoa Quebrada, Aracati - Ce**. 2007. 36 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Pesca) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

BAL, A.A. Sea caves, relict shore and rock platforms: evidence for the tectonic stability of Banks Peninsula, New Zealand. **Journal of Geology and Geophysics**, v. 40, p. 299-305. 1997.

BARKWITH, A.; HURST, M.D.; THOMAS, C.W.; ELLIS, M.A.; LIMBER, P.L.; MURRAY, A.B. Coastal vulnerability of a pinned, soft-cliff coastline, II: assessing the influence of sea walls on future morphology. **Earth Surf. Dynam.**, v. 2, p. 233-242, 2014.

BARKWITH, A.; THOMAS, C.W.; LIMBER, P.W.; ELLIS, M.A.; MURRAY, A.B. Coastal vulnerability of a pinned, soft-cliff coastline – Part I: Assessing the natural sensitivity to wave climate. **Earth Surf. Dynam.**, v. 2, p. 295-308, 2014.

BARRETO, E.P.; MANSO, V. A.V.; GREGÓRIO, M.N.; SILVA, C. F. A.; FERREIRA, B. Análise sedimentológica da plataforma continental interna rasa da praia de São José da Coroa Grande - Litoral Sul de Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.10, n.01, 246-266, 2017.

BBC. 2012. **Charlotte Blackman: Rain caused Dorset cliff landslide**. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/uk-england-dorset-19011681>. Acesso em: 6 de julho de 2022.

BEARDSELL, A.; GAUTHIER, G.; FORTIER, D.; THERRIEN, J.F.; BÊTY, J. Vulnerability to geomorphological hazards of an Arctic cliff-nesting raptor, the rough-legged hawk. **Arctic Science**. V. 3(2): 203-219. 2017.

BERTANI RT, COSTA IG & MATOS RMD. **Evolução tecno sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar**. In: ´GABAGLIA GPR & MILANI EJ (Eds.). Origem e Evolução das Bacias ~ Sedimentares. Petrobras, Rio de Janeiro, 291-310. 1990.

BEZERRA, F.H.R. **Deformação tectônica na Formação Barreiras: exemplos das bacias Potiguar e Paraíba, Brasil**. XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA. III Encontro do Quaternário Sulamericano. 2011.

BEZERRA, F.H.R.; BARRETO, A.M.F.; SUGUIO, K. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. **Marine Geology**, v. 196(1-2), p. 73-89. 2003.

BHATTACHARYA, F.; SHUKLA, A.D.; PATEL, R.C.; RASTOGI, B.K.; JUYAL, N. Sedimentology, geochemistry and OSL dating of the alluvial succession in the northern Gujarat alluvial plain (western India) - A record to evaluate the sensitivity of a semiaridfluvial system to the climatic and tectonic forcing since the late Marine Isotopic Stage 3. **Geomorphology**, v. 297, p. 1-19. 2017.

BIGARELLA, J. J.; ANDRADE, G. O. **Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras)**. UR – ICT. Arquivos, 2. Recife. 1964.

BIGARELLA, J.J. The Barreiras Group in northeastern Brazil. **Anais Academia Brasileira de Ciência**, v.47, p. 365-393, 1975.

BIRD, E. **Coastal Cliffs: Morphology and Management**, SpringerBriefs in Earth Sciences, 2016. DOI 10.1007/978-3-319-29084-3_1

BIRD, E. **Coastal geomorphology: an introduction** / Eric Bird. — Second. ed. p. 67 – 106. Australia: Wiley, 2008.

BORGES, P.; PHILLIPS, M.R.; NG, K.; MEDEIROS, A.; CALADO, H. Preliminary coastal vulnerability assessment for Pico Island (Azores). In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), **Journal of Coastal Research**, Special Issue No. 70, pp. 385-388, 2014.

BORUFF, B.J.; EMRICH, C.; CUTTER, S.L. 2005. Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. **Journal of Coastal Research**, Vol. 21, No. 5, 2005.

BOSOM, E., JIMÉNEZ, J.A., 2011. Probabilistic coastal vulnerability assessment to storms at regional scale – application to Catalan beaches (NW Mediterranean). **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** 11, 475–484. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-475-2011>.

BRAGA, F. P. S.; SOUZA FILHO, P. W. M.; ALVES, M. A. M. S.; PEREIRA, L.C.C. Morfologia e sedimentologia da praia de macromaré de Ajuruteua, Amazônia, norte do Brasil, **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 60, p. 11-30, 2007.

BRANCO, M.P.N.C. **Análise dos Sistemas Depositionais e Dinâmica Costeira do Município de Aquiraz, Estado do Ceará, com auxílio de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 250f. Dissertação de Doutorado N° 066. Instituto de Geociência. Universidade de Brasília. 2003.

BRASIL, 2012. Lei nº 12. 651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm Acesso em: 02 de junho de 2022.

BRASIL, Lei no 9.985, 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o , incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2000.

BRASIL, Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. **Projeto RADAMBRASIL, Folha SA - 24 – Fortaleza**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso e proteção da terra. Rio de Janeiro, 1981.

BROOKS, S.M.; SPENCER, T. Temporal and spatial variations in recession rates and sediment release from soft rock cliffs, Suffolk coast, UK. **Geomorphology**, v. 124, p. 26–41, 2010.

CALLIARI, L.J., MUEHE, D., HOEFEL, F.G.; TOLDO JR.E.E. Morfodinâmica Praial: Uma Breve Revisão. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 50, p. 63-78, 2003.

CÂMARA, I.F.; SILVA, R. R. Mapeamento e evolução da ocupação irregular em falésias do litoral leste cearense, nordeste do Brasil. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 40, n. 4, p. 1033 – 1046, 2021.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. Climatologia. CAMPOS, A. A. (ed) In: **A zona Costeira do Estado do Ceará: Diagnóstico para a Gestão Integrada**. Fortaleza: AQUASIS, p. 51-53, 2003.

CARTER, R.W.G; JENNINGS, S.C.; ORFORD, J.D. Headland Erosion by Waves. **Journal of Coastal Research**. v. 6, No. 3, p. 517-529, 1990.

CARVALHO NETA, M. L. **Evolução Geomorfológica Atual e Análise Ambiental da Foz do Rio Jaguaribe – Ceará**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, 2007.

CASTELO BRANCO, M.P.N. **Análise dos Sistemas Depositionais e Dinâmica Costeira do Município de Aquiraz, Estado do Ceará, com auxílio de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 250f. Dissertação de Doutorado N° 066. Instituto de Geociência. Universidade de Brasília. 2003.

CEARÁ. 2019. Diário Oficial do Estado. Secretaria do Meio Ambiente. Portaria N° 171/2019 - Resolve: **Aprovar o Plano de Manejo da Unidade de Conservação de Proteção Integral Monumento Natural das Falésias de Beberibe**. Disponível em: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Portaria-no.-171-2019_aprovacao-Plano-de-Manejo-Falesias-de-Beberibe.pdf. Acesso em: 18 de julho de 2022. 2019.

CLAUDINO-SALES, V. (2019). Mistaken Point, Canada. In: Coastal World Heritage Sites. **Coastal Research Library**, vol 28. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1528-5_18

COHEN, M. C. L.; LARA, R. J.; SMITH, C. B.; ANGÉLICA, R. S.; DIAS, B. S.; PEQUENO, T. Wetland dynamics of Marajó Island, northern Brazil, during the last 1000 years. **CATENA**. v. 76, n. 1, p. 70-77, 2008.

COLLINSON, A.D. **Aluvial sediments**. In: CASTELO BRANCO, M.P.N. **Análise dos Sistemas Depositionais e Dinâmica Costeira do Município de Aquiraz, Estado do Ceará, com auxílio de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 250f. Dissertação de Doutorado N° 066. Instituto de Geociência. Universidade de Brasília. 2003.

CONAMA, 2003. Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente n° 303, de 20 de março de 2002. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98313>. Acesso em 02 de junho de 2022.

COOPER, J.A.G. Beachrock formation in low latitudes: implications for coastal evolutionary models. **Mar. Geol.**, 98 (1) (1991), p. 145-154, 1991.

COTRIM, C.S.; SEMEDO, A.; LEMOS, G. Brazil Wave Climate from a High-Resolution Wave Hindcast. **Climate** 2022, 10, 53.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do estado do Ceará**. Escala 1:500.000. 2003.

CUNHA, E.M.S. **Evolução actual del litoral de Natal RN (Brasil) y sus aplicaciones a la gestión integrada**. 2004. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências del Mar Departament D'ecologia, Departament D'estratigrafia I Paleontologia, Barcelona, Universitat de Barcelona, Barcelona, 2004.

DAIGNEAULT, M.; BOUCHARDON, J-L.; GUY, B. **Coastal cliff erosion vulnerability on the Canadian east coast (Baie des Chaleurs area): a multi-parameter visualization tool**. in: MORTIMORE, R. N. & DUPERRET, A. (eds) 2004. Coastal Chalk Cliff Instability. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 20, 149-167. 0267-9914/04/\$15.00 © The Geological Society of London 2004. by guest on April 30, 2019. Disponível em: <https://egsp.lyellcollection.org/Downloaded>

DAVIDSON-ARNOTT, R. **Introduction to Coastal Processes and Geomorphology**. Cambridge, 442 p. 2010.

DEL RÍO, L. & GARCIA, F.J. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. **Geomorphology**, v. 112, p. 82–95, 2009.

DI LUCCIO, D.; AUCELLI, P. C.; DI PAOLA, G.; PENNETTA, M.; BERTI, M.; BUDILLON, G.; FLORIO, A.; BENASSAI, G. **An Integrated Approach for Coastal Cliff Susceptibility: The Case Study of Procida Island (Southern Italy)**. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4069782>

DI PAOLA G, AUCELLI PPC, BENASSAI G, IGLESIAS J, RODRÍGUEZ G, ROSSKOPF CM (2018) The assessment of the coastal vulnerability and exposure degree of Gran Canaria Island (Spain) with a focus on the coastal risk of Las Canteras Beach in Las Palmas de Gran Canaria. **J Coast Conserv**, v. 22, p. 1001–1015. <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0574-9>

DIAS, J.A. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos (uma introdução à oceanografia geológica)**. Universidade do Algarve. 91p. 2004.

DIAS, J.M.A.; NEAL, W.L. Sea Cliff Retreat in Southern Portugal: Profiles, Processes and Problems. **Journal Coastal Research**, vol 8, n.3: 641-654, 1992.

DICKSON, M. E.; PERRY, G. L.W. Identifying the controls on coastal cliff landslides using machine-learning approaches. **Environmental Modelling & Software**, v. 76, p. 117 – 127, 2016.

DOMÈNECH, T. COROMINAS, J.; MAVROULI, O.; MERCHEL, S.; ABELLÁN, A.; PAVETICH, S.; RUGEL, G. Calculation of the rockwall recession rate of a limestone cliff, affected by rockfalls, using cosmogenic chlorine-36. Case study of the Montsec Range (Eastern Pyrenees, Spain). **Geomorphology**, v. 306, p. 325–335, 2018.

DOMINGUEZ, J.M.L. **A evolução "Pós-Barreiras" da zona costeira leste do Brasil**. XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA. Anais do Congresso ABEQUA 2011, ISSN: 2318-0986. V.1, disponível em: <<http://www.abequa.org.br/trabalhos/landim2011.pdf>> Acesso em: 13 de novembro de 2019.

DUARTE, D. M. **Erosão e progradação da praia de Pontal De Maceió, Fortim, Ceará.** 2018. 97 p. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

DUARTE, H.A. Ferro – um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Quim. Nova**, Vol. 42, No. 10, 1146-1153, 2019.

DUPERRET, A., BERTELLE, C., LAVILLE, P., 2009. **Cliff Collapse Hazards Spatio-Temporal Modelling through GIS: from Parameters Determination to Multi-scale Approach.** In: Complex Systems and Self-organization Modelling, Berlin, pp. 117-127.

EALEY P.J.; JAMES H.C.L. Shore platforms and raised beach deposits at Porthleven and the Most Southerly Point, west Cornwall. **Geoscience in south-west England**, v. 10, 2001.

EARLIE, C. S.; YOUNG, A. P.; MASSELINK, G.; RUSSELL, P. E. Coastal cliff ground motions and response to extreme storm waves, **Geophys. Res. Lett.**, v. 42, p. 847–854, 2015.

EMERY, K.O. & KUHN. Sea Cliffs: Theirs, Processes, Profiles, And Classification. **Geological Society of America Bulletin**, v. 93, p. 644 -654, 1980.

EPIFANIO, B.; ZÉZERE, J. L.; NEVES, M. Identification of hazardous zones combining cliff retreat rates with landslide susceptibility assessment. **Journal of Coastal Research**, Special Issue No. 65, 2013.

ESPOSITO, G.; SALVINI, R.; MATANO, F.; SACCHI, M.; TROISE, C. Evaluation of geomorphic changes and retreat rates of a coastal pyroclastic cliff in the Campi Flegrei volcanic district, southern Italy. **Journal of Coastal Conservation**, v. 22, inssue 5, p. 957-972, 2018.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológico.** In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (ed) Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro p. 123-194, 1996.

FINZI, Y. & HARLEV, N., A regional approach for modeling cliff retreat rate: The Makhteshim Country, Israel. **Geomorphology**, v. 271, p. 65–73, 2016.

FOGAÇA, J.R.V. "Óxidos básicos"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/oxidos-basicos.htm>. Acesso em 12 de fevereiro de 2021.

FOLK, R.L; WARD, W. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, n/1, v. 27, n. 1, p. 3-26, Mar. 1957.

FREIRE, L.V. Comportamento mecânico de misturas de areia e finos de um sedimento pós-barreiras da cidade de Natal – RN. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 113f, 2019.

FULLERTON, D.S.; BUSH, C.A. **Glacial Limits**. Servicio Geológico de EE. UU, febrero de 2004. Disponível em: https://web.archive.org/web/20080203104337/http://www.nationalatlas.gov/articles/geology/a_glacial.html Acesso em: 5 de setembro de 2022.

G1 CE. **Relatório aponta risco de deslizamento de falésias em praias do litoral leste do Ceará**. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2022/02/03/relatorio-aponta-risco-de-deslizamento-de-falesias-em-praias-do-litoral-leste-do-ceara.ghtml>. Acesso em: 9 de agosto de 2022.

G1. 2022. **Relatório aponta risco de deslizamento de falésias em praias do litoral leste do Ceará**. Disponível em; <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2022/02/03/relatorio-aponta-risco-de-deslizamento-de-falesias-em-praias-do-litoral-leste-do-ceara.ghtml>. Acesso em: 6 de julho de 2022.

G1. **Chuva abre cratera, e casas são esvaziadas em Morro Branco**. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2021/03/26/chuva-abre-cratera-e-casas-sao-esvaziadas-apos-chuva-forte-em-morro-branco.ghtml>. Acesso em: 6 de julho de 2022. 2021-a.

G1. **Tragédia que matou família em Pipa expõe risco de acidentes com falésias**. Por Emmily Virgílio — Natal. Disponível em: <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2020/11/22/tragedia-que-matou-familia-em-pipa-expoe-risco-de-acidentes-com-falesias.ghtml>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2021. 2021.

GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; KARYMBALIS, E.; POULOS, S.E.; SENI, A.; ZOUVA, C. Coastal vulnerability assessment to sea-level rise based on geomorphological and oceanographical parameters: the case of Argolikos Gulf, Peloponnese, Greece. **Hellenic Journal of Geosciences**, vol. 45, 109-122, 2010.

GALILI, E. & ZVIELY, D. Geo-archaeological markers reveal magnitude and rates of Israeli coastal cliff erosion and retreat. **Journal of Coastal Conservation**, v. 23, p. 747–758, 2018.

GANDINI, R.; ROSSETTI, D.F.; NETTO, R.G.; BEZERRA, F.H.R.; GÓES, A.M. Neotectonics evolution of the Brazilian northeastern continental margin based on sedimentary Facies and Ichnology. **Quaternary Research** v. 82, p. 462–472, 2014.

GILHAM, J.; BARLOW, J.; MOORE, R. Detection and analysis of mass wasting events in chalk sea cliffs using UAV photogrammetry. **Engineering Geology**, v. 250 p, 101–112, 2019.

GLOBO. 2020. **Tragédia que matou família em Pipa expõe risco de acidentes com falésias**. Por Emmily Virgílio. Disponível em: <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2020/11/22/tragedia-que-matou-familia-em-pipa-expoe-risco-de-acidentes-com-falesias.ghtml>. Acesso em: 6 de julho de 2022.

GLOBO. 2022. **Capitólio: Corpo de Bombeiros confirma 10 mortos após queda de paredão**. Por Nathália Alves, g1 Centro-Oeste de Minas. Disponível em:

<https://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2022/01/09/capitolio-corpo-de-bombeiros-confirma-10-mortos-apos-queda-de-paredao.ghtml>. Acesso em: 06 de julho de 2022.

GODIN, E.; OSINSKI, G.R.; HARRISON, T.N.; PONTEFRAC, A.; ZANETTI, M. Geomorphology of Gullies at Thom as Lee Inle t, Devon Island, Canadian High Arctic. **Permafrost and Periglac Process**, v. 30, p. 19 – 34, 2019.

GOMES, L.S.; FURTADO, A.C.R.; SOUZA, M.C. A Sílica e suas Particularidades. **Rev. Virtual Quim.**, v. 10 (4), 2018.

GONCALVES JUNIOR, J. T.; Oliveira, I.de P; CRUZ, M. L. B.; Mendes, L.M.S. **Mapeamento das fontes d'água no município de Beberibe-CE**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, VIÇOSA - MG. http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo1/042.pdf, 2009.

GONZALEZ, T.V.F.C.; GARÇÃO, B.R.; COSTA, K.A.; PAIVA, R.F.P.S.; FREITAS, W.K. **Perfil de pescadores “jangadeiros” Recursos Naturais de Beberibe, Ceará**. 16 ° Congresso Nacional do Meio Ambiente Justiça social e sustentabilidade medianizado pela economia verde MG 1 Brasil ISSN online N° 24 a 27 de setembro 2019 Poços de Caldas 23179686 V. 11 N.1 2019.

GORDON, FR. "The Rockfall of Huzzas Cliff, Gracetown, Western Australia", Proceedings 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics: Consolidating Knowledge, Australian Geomechanics Society: 599-606, ISBN 978-1-86445-002-6, 1999.

GRIGGS, G. B.; RUNYAN, K. **Cliff Erosion and Bluff Retreat Along the California Coast**. Oceans 2003. Celebrating the Past. Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No.03CH37492). 2003.

GUERRA, A. J. T; GUERRA, A. J. **Novo dicionário geológico geomorfológico**. 5 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

GUERRA, A.J.T. **Processos erosivos nas encostas**. In: GUERRA A.J.T. E CUNHA, S.B. da (orgs). Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos. Bertrand do Brasil, Rio de Janeiro. p. 139-156. 1994.

GUERRA, R. G. P. **Vulnerabilidade costeira a eventos de alta energia no Litoral de Fortaleza, Ceará**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

GUILCHER, A. **Coastal and Submarine Morphology**. London: Methuen, 274p. 1958.

GUTIERREZ, B.T., PLANT, N.G., THIELER, E.R., 2011. A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise. **J. Geophys. Res. Earth Surf.** 116 (2), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2010JF001891>

HAMMAR-KLOSE, E.S.; THIELER, E.R. **Coastal vulnerability to sea-level rise: A preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific and Gulf of Mexico coasts** [CD-ROM], Vol. 68. US Geological Survey Digital Data Service: Woods Hole MA. 2001.

HARRASSOWITZ H. **Laterit. Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung.** – Fortschritte der Geologie und Paläontologie, 4, 14. Berlin. 1926.

HIMMELSTOSS, E.A.; HENDERSON, R.E.; KRATZMANN, M.G.; FARRIS, A.S. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide:** U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179, 110 p., 2018.

IBAMA. Ministério do meio ambiente. **Acordo de Cooperação 1, de 17 de setembro de 2013.** PUB DOFC 16/10/2013 000155 3. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/CT0001-170913.pdf>. Acesso em: 19 de julho de 2022. 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Censo Brasileiro de 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

ICAPUÍ - Lei nº 262/98, de 08 de abril de 1998. **Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental - APA da Praia de Ponta Grossa e adota outras providencias.** Prefeitura municipal de Icapuí. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/9a-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/diretrizes-ambientais/lei_apa_ponta_grossa.pdf. Acesso em: 2 de fevereiro de 2021.

IPCC, 2018. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Summary for Policymakers.** In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001.2018>.

IPCC. 2014. **Climate Change 2014:** Synthesis Report. In Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds). Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland 10013/epic.45156.d001.

IPECE- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em números.** [S.l.]: [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.ipece.ce.gov.br/categoria5/ceara-emnumeros>.

ISDR-International Strategy For Disaster Reduction. **Living with Risk:** A global review of disaster reduction initiatives. Geneva: World Meteorological Organization and the Asian Disaster Reduction Center, 2004. Disponível em:

http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm>. Acesso em 26 de julho de 2022.

KHATTABI, J.E.L., CARLIER, E., LOUCHE, B., 2018. The effect of rock collapse on coastal cliff retreat along the chalk cliffs of northern France. **Journal of Coastal Research**. v. 34 (1), p. 136–150. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00116.1>.

KOROGLU A, RANASINGHE R, JIMÉNEZ JA, DASTGHEIB A. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province. **Ocean Coast Manag**, v. 178, Volume 178, 2019, 104799, ISSN 0964-5691.

KUMAR, B.S.; BALUKKARASU, A.; TAMILARASAN, K. Coastal Vulnerability Mapping using Remote Sensing and GIS Techniques in Tuticorin Coast of Tamil Nadu, India. **Journal of Geography, Environment and Earth Science International**, v. 20(2), p. 1-12, 2019.

KUNH, D. & PRÜFER, S. Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany. **Geomorphology**, v. 213, p. 153–165, 2014.

LAMBECK, K.; CHAPPELL, J. Sea level change through the last glacial cycle. **Science**, vol 292, p.679-686, 2001.

LANTUIT, H.; OVERDUIN, P.P.; COUTURE, N.; WETTERICH, S.; ARÉ, F.; ATKINSON, D.; BROWN, J.; CHERKASHOV, G.; DROZDOV, D.; FORBES, D.L.; GRAVES-GAYLORD, A. The Arctic coastal dynamics database: a new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. **Estuaries and Coasts**, v. 35, p. 383–400, 2012.

LANTUIT, H.; OVERDUIN, P.P.; COUTURE, N.; WETTERICH, S.; ARÉ, F.; ATKINSON, D.; BROWN, J.; CHERKASHOV, G.; DROZDOV, D.; FORBES, D.L.; GRAVES-GAYLORD, A. The Arctic coastal dynamics database: a new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. **Estuaries and Coasts**, v. 35, p. 383–400, 2012.

LEITE, N. S.; RIZZATI, I. M.; SILVA, E. V. Análise Paisagística do Litoral do Município de Fortim – Ceará: Subsídios ao Planejamento Ambiental Local. **Espaço Aberto**, PPGG – UFRJ. V. 6 (2), p. 103-125, 2016.

LIMA, E. N. M. **Tectônica pós-rifte na Bacia Potiguar Tectônica pós-rifte na Bacia Potiguar**. 166f. Tese (Doutorado em geodinâmica e Geofísica). Universidade federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

LIMA, L.C.; MORAIS, J.O.; SOUZA, M.J.N. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. 268p. Editora FUNECE, Fortaleza, 2000.

LIMA, M. DA G. **A História do Intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil**. 251f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2008.

LISIECKI, LE; RAYMO, ME. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. **Paleoceanography**, v. 20, P.1003, 2005.

LOPEZ, P.M.; PAYO, A.; ELLIS, M.A.; CRIADO-ALDEANUEVA, F.; JENKINS, G.O. A Method to Extract Measurable Indicators of Coastal Cliff Erosion from Topographical Cliff and Beach Profiles: Application to North Norfolk and Suffolk, East England, UK. **J. Mar. Sci. Eng.** V 8, p.1-22, 2020.

MABESOONE, J. M.; SILVA, A. C. E.; BEURLEN, K. Estratigrafia E Origem Do Grupo Barreiras Em Pernambuco, Paraíba E Rio Grande Do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 2, n. 3, p. 173–188, 1971.

MAHAMOUD, A., GZAM, M., AHMED MOHAMED, N. et al. A preliminary assessment of coastal vulnerability for Ngazidja Island, Comoros Archipelago, Western Indian Ocean. **Environ Earth Sci**, v. 81, 44 (2022).

MAIA, G.O.; PINHEIRO, L.P. Eventos de alta energia e suas consequências na zona costeira do município de Aquiraz, estado do Ceará. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, 2016, 49(1): 74 - 90. 2016.

MAIA, L.P. **Controle tectônico e evolução geológica/sedimentar da região da desembocadura do Rio Jaguaribe**. 144p. Dissertação Centro de Tecnologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1993.

MAIA, L.P. **Proceso costeros y balance sedimentario ao lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): implicaciones para uma gestão adequada de la zona litoral**. 269f. Tese (Doutorado em Ciências do Mar). Universidade de Barcelona, Espanha, 1998.

MAIA, L.P., JIMENEZ, J.A., FREIRE, G.S.S. AND MORAIS, J.O., (2000). **Dune migration and aeolian transport along Ceará (NE Brasil): Downscaling and upscaling aeolian induced processes**. Coastal Sediments ASCE: 1220-1232.

MAIA, L.P.; FREIRE, G.S.S.; LACERDA, L.D. Accelerated dune migration and eolian transport during El Niño events along the NE Brazilian Coast. **J Coast Res**, v. 6, p. 1121–1126, 2005.

MAIA, R.P. **Geomorfologia e Neotectônica no Vale do rio Apodi-Mossoró RN**. Natal, 2012. 218 p. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica), Centro de Ciências Exatas e da Terra - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.

MAIA, R.P.; BEZERRA, F.H.R. 2011. Neotectônica, geomorfologia e sistemas fluviais: Uma análise preliminar do contexto nordestino. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.12, n.3, p.37-46, 2011.

MAIA, R.P.; BEZERRA, F.H.R. 2014. Inversão neotectônica do relevo na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.1, (Jan-Mar) p.61-74, 2014.

MALCOLM J. BRAY, & JANET M. HOOKE. (1997). Prediction of Soft-Cliff Retreat with Accelerating Sea-Level Rise. **Journal of Coastal Research**, 13(2), 453–467. <http://www.jstor.org/stable/4298640>.

MARQUES, F., 2018. Regional scale sea cliff hazard assessment at Sintra and Cascais Counties, Western Coast of Portugal. **Geosciences**. v. 3 (3), p. 1-13. 10.3390/geosciences8030080.

MARRERO, S. M.; HEIN, A. S.; NAYLOR, M.; ATTAL, M.; SHANKS, R.; WINTER, C.; WOODWARD, J.; DUNNING, S.; WESTOBY, M; SUGDEN, D. Controls on subaerial erosion rates in Antarctica. **Earth and Planetary Science Letters**. V. 501, p. 56–66, 2018.

MARTINS, L.R. Recent Sediments and Grain size analysis: **Revista Gravel**, Porto Alegre, v.1. s/n, p. 90-105. 2003.

MARTINS, V.M.; PIRES, R.; CABRAL, P. Modelling of coastal vulnerability in the stretch between the beaches of Porto de Mós and Falésia, Algarve (Portugal). **Journal of Coastal Conservation**, volume 16, p. 503–510, 2012.

MASON, C.C. & FOLK, R.L. Differentiation of beach, dune, and aeolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.28, n.2, 211-226, jun./1958.

MATOSO, S.Q.; ROBERTSON, F.S. **Uso geológico do termo “Barreiras”**. Rio de Janeiro-RJ. Bol. Tec. PETROBRAS, v.2, p. 37-43. 1959. In: MOURA-FÉ, M. M. Barreiras: Série, Grupo ou Formação? Revista Brasileira de Geografia Física, v. 07, p. 1055–1061, 2014.

MEIRELES, A.J.A., **Geomorfologia costeira: funções ambientais e sociais**. 489 p. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

MEIRELES, A.J.A.; SANTOS, A.M.F. Evolução geomorfológica da planície costeira de Icapuí, extremo leste do Ceará, nordeste do Brasil. **Geografia**, Rio Claro, v. 36, n. 3, p. 519-533, set./dez. 2011.

MICCADEI, E.; MASCIOLI, F.; RICCI, F.; PIACENTINI, T. Geomorphology of soft clastic rock coasts in the mid-western Adriatic Sea (Abruzzo, Italy). **Geomorphology**, v. 324, p. 72 – 94, 2019.

MOORE, R.; ROGERS, J.; WOODGET, A. **Climate Change Impact On Cliff Instability And Erosion**. FCRM>10, International Centre, Telford 28th June – 1st July 2010.

MOORE, R.; ROGERS, J.; WOODGET, A. **Climate change impact on cliff instability and erosion**. FCRM>10, International Centre, Telford 28th June – 1st July 2010.

MORAIS, J. O. Evolução Sedimentar da Enseada do Mucuripe. **Arquivos de Ciências do Mar**, [S.I.], v. 21, p. 20-32. 1980.

MORAIS, J. O.; PINHEIRO, L. S.; CAVALCANTE, A. A.; PAULA, D. P.; SILVA, R. L. Erosão Costeira em Praias Adjacentes às Desembocaduras Fluviais: O Caso de Pontal de Maceió, Ceará, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 8(2), p 61-76, 2008.

MORAIS, J. O.; PINHEIRO, L. S.; PESSOA, P. R. S.; FREIRE, G. S.; CARVALHO, A. M.; GUERRA, R. G. P.; BARROS, E.L.; MOURA, F. J. M., 2018. In: **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. (Org.) Muehe, D.; Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2ed. Rio de Janeiro, v.1, p. 261 – 289, 2018.

MORAIS, J. O.; FREIRE, G. S.; PINHEIRO, L. S.; SOUZA, M. J. N.; CARVALHO, A. M.; PESSOA, P. R. S., 2006. In: **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. (Org.) Muehe, D.; Ministério do Meio Ambiente (MMA). 1ed. Rio de Janeiro, v.1, p. 132-134, 2006.

MORAIS, J.O. **Processos Interativos na Elaboração da Zona Costeira do Estado do Ceará e Impactos Associados**. Fortaleza, Brasil. 1998. 225 p. Tese (Professor Titular), Universidade Estadual do Ceará.

MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.S.; PESSOA, P.R.S.; FREIRE, G.S.; CARVALHO, A.M.; GUERRA, R.G.P.; BARROS, E.L.; MOURA, F.J.M. Capítulo Ceará. In: **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. MUEHE, D. (Coord); Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2ed. Rio de Janeiro, v.1, p. 261 – 289, 2018.

MORAIS, J.O.; FREIRE, G.S.; PINHEIRO, L.S.; SOUZA, M.J.N.; CARVALHO, A.M.; PESSOA, P.R.S. Capítulo Ceará. In: **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. MUEHE, D. (Coord); Ministério do Meio Ambiente (MMA). 1ed. Rio de Janeiro, v.1, p. 132-134, 2006.

MORAIS, S.J.; FREITAS, N. (2020). Geotechnical properties of the barreiras formation sediments in the cliffs of barra de tabatinga, eastern coast of Rio Grande do Norte / Brazil. **HOLOS**, Ano 36, v.7, e 9560, 2020.

MOURA, M.R. **Processos costeiros e evolução da ocupação nas praias do litoral oeste de Aquiraz, Ceará entre 1970-2008**, 2009. 137 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará.

MOURA-FÉ, M. M. Barreiras: Série, Grupo Ou Formação? **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, p. 1055–1061, 2014.

MUEHE, D. Brazilian coastal vulnerability to climate change. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5(2), p. 173-183. 2010.

MUSHKIN, A.; KATZ, O.; PORAT, N. Overestimation of short-term coastal cliff retreat rates in the eastern Mediterranean resolved with a sediment budget approach. **Earth Surface Processes and Landforms**. V. 44, p. 179–190, 2019.

NAGESWARA, R.K.; SUBRAELU P.; VENKATESWARA, R.T.; HEMA, M.B.; RATHEESH, R.; BHATTACHARYA, S.; RAJAWAT, A.S.; AJAI. Sea-level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast India through remote sensing and GIS. **J Coast Conserv**, v. 12, p. 195–207, 2008.

NASCIMENTO, D. A. (1981). Geologia. In: BRASIL (1981), DNPM, **Projeto RADAMBRASIL, Folha SA - 24 - Fortaleza**, V. 21, p. 23 - 112, Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, K. A. **Caracterização da Erosão Marinha nas Falésias da Ponta do Retiro, Litoral Norte do RJ**. 106f. Dissertação (Mestrado em geologia e Geofísica Marinha). Universidade Federal do Fluminense, Niterói. 2006.

NAYLOR, L.A.; COOMBES, M.A.; VILES, H.A. Reconceptualising the role of organisms in the erosion of rock coasts: a new model. **Geomorphology**, v. 157, p. 17–30, 2012.

NICOLODI, J.L.; PETERMANN, R.M. Climate change and vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social, and technological aspects. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 10 (2), p. 151 -177. 2010.

NUNES, F.C.; SILVA, E.F.; VILAS BOAS, G.S. **Grupo Barreiras: características, gênese e evidências de neotectonismo — Dados eletrônicos.** — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 31 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos, 194). 2011.

OLIVEIRA, D.C.; Freitas, L.F.; Marinho, R.A.; Conceição, R.N.L. O uso insustentável de madeira na construção de armadilhas empregadas na pesca artesanal da lagosta na comunidade de redonda, Icapuí, Ceará. **Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 10, n. 2, mar. 2017. ISSN 1982-5528. Disponível em: <<http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/417>>. Acesso em: 19 jul. 2022.

OLIVEIRA, E.B.; NICOLLODI, J.L.; MARINHO, C.; MACHADO JÚNIOR, V.C. Caracterização sedimentológica da Praia de Arambaré, Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 665-678, out./dez. 2018.

OLIVEIRA, I.R.M. **Cinco mortos e três feridos em derrocada de arriba em Albufeira**. Jornal Público Comunicação Social AS. Disponível em: <<https://www.publico.pt/2009/08/22/jornal/cinco-mortos-e-tres-feridos-em-derrocada-de-arriba-em-albufeira-17627410>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2021.

PAISANI, J. C., M. E. PONTELLI, M. L. OSTERRIETH, S. D. L. PAISANI, A. FACHIN, S. GUERRA & L. OLIVEIRA. Paleosols in low-order streams and valley heads in the Araucaria Plateau – record of continental environmental conditions in Southern Brazil at the end of MIS 3. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 54, p. 57-70. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.04.005>.

PAULA, D. P., GONDIN, R. L.; MOUTA JUNIOR, A. W. A.; LIMA, J. S.; DIAS, J. M. A. **Gestão pública do litoral do Ceará: uma abordagem a partir do processo de urbanização da costa**. In: ENCONTRO DA REDE BRASPOR, 6., 2016. Fortaleza, O homem e o litoral: Transformações na paisagem ao longo do tempo. Fortaleza: [s.n.]. 2016. p. 53-53. v. 1.

PAULA, D.P.; DIAS, J.M.A.; FERREIRA, O.; ALMEIDA, L.P.M, & MORAIS, J.O. **Impactos costeiros induzidos por ressacas do mar ao longo do litoral norte de Fortaleza-CE (Brasil)**. Simpósio Internacional de Climatologia, 2011

PERROY, R.L.; BOOKHAGEN, B.; ASNER, G.P.; CHADWICK, O.A. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. **Geomorphology**, v. 118, p. 288– 300, 2010.

PETHICK, J. **An Introduction to Coastal Geomorphology**. Arnold, USA, 260p, 1983.

PINHEIRO, L. S. **Riscos e Gestão Ambiental no Estuário do Rio Malcozinhado, Cascavel – Ceará**. 232p. Tese (Doutorado em Oceanografia). Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

PINHEIRO, L.S.; MORAIS, J.O.; MAIA, L.P. **Capacidade de carga recreacional das trilhas do Monumento das Falésias de Beberibe-CE**. In: 9 TH V congresso sobre planejamento e gestão das zonas costeiras dos países de expressão portuguesa, 2009, Itajaí. CoastGIS´2009. Atas. Itajaí: Univali, v. 1. p. 255-255, 2009.

PINTO, Y. F. L. C.; COSTA, S.S.S.; SARAIVA JÚNIOR, J.C.S. **Perspectivas em geoturismo no mirante dos golfinhos, praia de Barra de Tabatinga, RN, Brasil**. Anais do Ensino GEO 2018: VIII Simpósio Nacional de Ensino e História de Ciências da Terra – 22 a 27 de julho de 2018, Campinas, SP: geociências para todos/Celso Dal Ré Carneiro. [et al.] (organizadores). - Campinas, SP: UNICAMP/IG, 2018.

PRADEEP, J. E. SHAJI, SUBEESH CHANDRAN C S, AJAS H, S.S. Vinod Chandra, S.G Dhanil Dev, D.S. Suresh Babu, Assessment of coastal variations due to climate change using remote sensing and machine learning techniques: A case study from west coast of India, Estuarine. **Coastal and Shelf Science**, Volume 275, 2022, 107968, ISSN 0272-7714.

PRÉMAILLON, M.; REGARD, V.; DEWEZ, T. J. B.; AUDA, Y. GlobR2C2 (Global Recession Rates of Coastal Cliffs): a global relational database to investigate coastal rocky cliff erosion rate variations. **Earth Surface Dynam.**, v. 6, p. 651–668, 2018.

PRODETUR - Programa De Desenvolvimento Do Turismo Do Ceará. **Plano de desenvolvimento integrado do turismo sustentável - Polo Litoral Leste Tomo I**. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.setur.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/59/2018/09/PDITS-litoral-leste-tomo-I.pdf](https://www.setur.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/59/2018/09/PDITS-litoral-leste-tomo-I.pdf). Acesso em: 18 de julho de 2022. 2014.

PROJETO ORLA - Projeto de Gestão Integrada da Orla Marítima. **Plano de intervenção na orla marítima de Beberibe-Ceará**. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2019/05/PGI-BEEBERIBE.pdf](https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2019/05/PGI-BEEBERIBE.pdf). Acesso em: 18 de julho de 2022. 2004.

PRUSZAK, Z.; ZAWADZKA, E. Vulnerability of Poland's Coast to Sea-Level Rise. **Coastal Engineering Journal**, Volume 47, Pages 131-155-. 2005 - Issue 2-3. <https://doi.org/10.1142/S0578563405001197>.

PÚBLICO. 2009. **Cinco mortos e três feridos em derrocada de arriba em Albufeira**. Por Idálio Revez e Mariana Oliveira 22 de agosto de 2009, 0:00. Disponível em: <https://www.publico.pt/2009/08/22/jornal/cinco-mortos-e-tres-feridos-em-derrocada-de-arriba-em-albufeira-17627410>. Acesso em: 6 de julho de 2022.

RAUKAS, A; GAIGALAS, A. (2008). Pleistocene glacial deposits along the eastern periphery of the Scandinavian ice sheets - an overview. **Boreas**. 22. 214 - 222. 10.1111/j.1502-3885.1993.tb00181.x.

ROCHA, M.N. **Dinâmica dos depósitos eólicos de bypass na planície costeira de Paracuru, Brasil**: subsídio para ações de contenção e manejo. Programa de Pós-Graduação em Geografia (Tese de Doutorado).148f. Fortaleza. 2017.

RODRIGUES DA SILVA, R. **Variabilidade espaço-temporal dos processos erosivos nas falésias de Canoa Quebrada-Aracati**. 2017. 100 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza-CE, 2017.

RODRIGUES DA SILVA, R.; PINHEIRO, L.S.; XIMENES NETO, A.R.; MORAIS, J.O. Lidar mapping in the coastal cliffs of east cearense (northeast Brazil). São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 39, n. 2, p. 463 - 479, 2020.

RODRÍGUEZ, G.M.A.; REAL, C.; RAMIL-REGO, P.; FRANCO, R.R.; CASTRO, H.L. Characteristics, vulnerability and conservation value of active tufa-forming springs on coastal cliffs in the NW Iberian Peninsula. **Ocean and Coastal Management**, v. 189, 2020.

ROSSER, N.J.; PETLEY, D.N.; LIM, M.; DUNNING, S.A.; ALLISON, R.J. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 38, p. 363–375, 2005.

ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F.H.R.; GÓES, M. M. VALERIANO, C. O. ANDRADES-FILHO, J. C. R. MITTANI, S. H. TATUMI & B. B. BRITO-NEVES. Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brazil: Landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v. 300, p. 191–204, 2011.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; VALERIANO, M.M.; MIRANDA, M.C.C. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v. 23, p. 121- 135, 2008.

ROSSETTI, D. F.; ROCCA, R. R.; TATUMI, S. H. Evolução dos sedimentos "Pós-Barreiras" na zona costeira da Bacia São Luís, Maranhão, Brasil Evolution of the Post-Barreiras Sediments in the coastal zone of São Luís Basin, Maranhão, Brazil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, v. 8, n. 1, p. 11–25, 2013.

ROSSETTI, D. F.; SOUZA, L. S. B.; GÓES, A. M. Estratigrafia Da Sucessão Sedimentar Pós- Barreiras (Zona Bragantina, Pará) Com Base Em Radar De Penetração No Solo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, n. 2, p. 113–130, 2001.

SAADI, A.; TORQUATO, J. R. Contribuição à Neotectônica do Estado do Ceará. **Revista de Geologia**, vol. 5, p. 5-38. 1992.

SALINAS Y.J.M, OLIVERA C.A.C, 2022, Vulnerability and Disaster Risk Assessment of a Cliff: the Case of the Costa Verde Cliffs in Lima, Peru, **Chemical Engineering Transactions**, 91, 469-474 DOI:10.3303/CET2291079

SALMAN A, LOMBARDO S, DOODY P. **Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability**. EuroSION project reports. Office for Official Publications of the European Communities. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:483327a3-dcf7-4bd0-a986-21d9c8ec274e>. 2004.

SAMPAIO, F.J. **Geologia, geocronologia e paleoclima do quaternário continental da região sul da Chapada Diamantina - Bahia** / Flávio José Sampaio. Salvador, 2013. 259 f.: il.

SANABRIA, L.L.O.; PEREIRA, E.; ANTONIOLLI, L. Revisão estratigráfica dos depósitos miocênicos aflorantes na região do alto de Olivença, litoral sul do estado da Bahia, Brasil. **Rev. bras. paleontol.** V. 18(3), p. 475-488, 2015.

SANTOS JÚNIOR, O.F.; COUTINHO, R.Q.; SEVERO, R.N.F. Propriedades geotécnicas dos sedimentos da Formação Barreiras no litoral do Rio Grande do Norte – Brasil. **Geotecnia** n.º 134, p. 87-108, 2015.

SANTOS, M.C. Turismo e ambientes costeiros nos dois lados do Atlântico: Potencialidades e implicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 8, n. 2, p. 94-104, 2014.

SANTOS, M, DEL RÍO, L, BENAVENTE, J. GIS-based approach to the assessment of coastal vulnerability to storms. Case study in the Bay of Cádiz (Andalusia, Spain). **J Coast Res** v. 65, pág. 826–831. 2013.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 100p. 5ª edição (Revisada e ampliada) Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SEMACE, Superintendência Estadual de Meio Ambiente. **Relatório Técnico Com Descritivo dos Produtos do Aerolevanteamento – Área 02 (09/2014) 4413_Rlt_SEMACE_13. 04413_SEMACE: Reestruturação e Atualização do Mapeamento do Projeto Zoneamento Ecológico Econômico Do Ceará – Zona Costeira e Unidades de Conservação Costeiras**, 2014.

SEMACE. Superintendência Estadual de Meio Ambiente. **Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada**. Disponível em: < <https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/09/area-de-protecao-ambiental-de-canoa->

quebrada/#:~:text=A%20%C3%81REA%20DE%20PROTE%C3%87%C3%83O%20AMBIENTAL,%C3%A0%20foz%20do%20Rio%20Jaguaribe.&text=A%20APA%20inclui%20as%20mais,%2C%20praias%2C%20picos%20e%20fal%C3%A9sias.>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2021.

SEMACE. Superintendência Estadual de Meio Ambiente. **Área de Proteção Ambiental da Praia de Ponta Grossa.** Disponível em: <<https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/09/area-de-protacao-ambiental-da-praia-de-ponta-grossa/>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2021.

SEMACE. Superintendência Estadual de Meio Ambiente. **Monumento Natural das Falésias de Beberibe.** Disponível em: <<https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/08/monumento-natural-das-falesias-de-beberibe/>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2021. 2010a.

SETUR, Secretaria do turismo. Governo do Estado do Ceará. **Plano de Manejo, contextualização do Monumento Natural (MONA) das falésias de Beberibe.** Programa nacional de desenvolvimento do turismo PRODETUR/NACIONAL CEARÁ. Contrato de empréstimo nº 2321/OC-BR, Secretaria do turismo (SETUR/CE). Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2020/06/Encarte_2_An%C3%A1lise-Regional-MONA-das-Fal%C3%A9sias-de-Beberibe.pdf. Acesso em: 18 de julho de 2022. 2019.

SETUR/CE - Secretaria de Turismo do Estado Ceará. **Evolução do Turismo no Ceará 2006/2016.** Disponível em: <https://www.setur.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/59/2016/11/evolucao-turismo-2006-2016-artigo.pdf>. Acesso em: 10dez2020. 2016.

SHORT, A.D.; WOODROFFE, C.D. **The Coast of Australia.** Cambridge University Press: Melbourne, Australia. 2009.

SILVA, A.C.; FAÇANHA, P.; BEZERRA, C.; ARAUJO, A.S.; PITOMBEIRA, E. Características das ondas “Sea” e “Swell” observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e interanual. **Trop Ocean.** v. 39, p.17–26, 2011.

SILVA, J.S. & FARIAS FILHO, M.S. Expansão urbana e impactos ambientais na zona costeira norte do município de São Luís (MA). **Raega – O Espaço Geográfico em Análise,** v. 46, n. 1, p. 07-24, 2019.

SILVA, M.A.C. **Impacto socioeconômico do turismo em municípios brasileiros: avaliação do PRODETUR/NE I e II.** Dissertação de mestrado. Programa de Mestrado Profissional da Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getulio Vargas. 58 f. 2022.

SILVA, R. R.; PINHEIRO, L.S.; XIMENES NETO, A.R.; MORAIS, J.O. Lidar mapping in the coastal cliffs of east cearense (northeast Brazil). São Paulo, UNESP, **Geociências,** v. 39, n. 2, p. 463 - 479, 2020.

SILVA, R.C.L.V. **O Impacto do Turismo em Área de Relevante Interesse Ecológico: a Praia do Estevão.** 2002. Sem Numeração Dissertação (Mestrado Acadêmico ou Profissional em 2002) - Universidade Estadual do Ceará, 2002. Disponível em: <<http://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=24786>> Acesso em: 13 de julho de 2022

SILVA, R.R. **Variabilidade espaço-temporal dos processos erosivos nas falésias de Canoa Quebrada-Aracati.** 2017. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SIQUEIRA, A.C.A.; MAGINI, C.; DANTAS, E.L.; FUCK, R.A.; SASAKI, J.M. 2014. Lateritas do Domínio Médio Coreaú – Comportamento geoquímico de mantos lateríticos do Noroeste do Estado do Ceará. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44(2), p. 249-264, 2014.

SIQUEIRA, F.A.; URANO, D.G.; PEREIRA, R.M.F.A. O setor hoteleiro na praia de Canoa Quebrada/CE: Processo de expansão urbana e turística. **Revista de Turismo Contemporâneo – RTC**, Natal, v. 5, n. 1, p. 23-41, jan./jun. 2017.

SMITH, A.J. & MORAIS, J.O. Estudos preliminares sobre a geologia ambiental costeira do estado do Ceará, Nordeste do Brasil. **Arquivo de Ciências do Mar**, v. 23, p. 85 – 96, 1984.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of Soil Science Terms.** Soil Science Society of America, Madison, WI. Disp.em: <<http://www.soils.org/sssagloss/>>. 2001.

SOUSA, D. C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozoica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil).** 222f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2002.

SOUSA, D. DO C.; SÁ, E. F. J. DE; ANTUNES, A. F. Deformação neógena e suas implicações na estruturação dos campos de petróleo na região de Icapuí-Ponta Grossa (CE), Bacia Potiguar emersa. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 97–110, 2008a.

SOUSA, D.C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozoica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil).** Natal, 2002. 222 p. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOUSA, D.C.; SÁ, E.F.J.; ANTUNES, A.F. Deformação neógena e suas implicações na estruturação dos campos de petróleo na região de Icapuí-Ponta Grossa (CE), Bacia Potiguar emersa. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 97–110, 2008.

SOUSA, D.C.; SÁ, E.F.J.; VITAL, H.; NASCIMENTO, M.A.L. **Falésias na Praia de Ponta Grossa, Icapuí, CE - Importantes deformações tectônicas cenozóicas em**

rochas sedimentares da Formação Barreiras. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil SIGEP 120, 2008. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C.R.G.; FERNANDES, A.C.S.; BERBERTBORN, M.; QUEIROZ, E.T.; (Eds.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Publicado na Internet em 24/09/2008 no endereço <<http://sigep.cprm.gov.br/sitio120/sitio120.pd>>.

SOUZA, R.A. **Resistência e compressibilidade de solos da Formação Barreiras da região de Natal/RN.** Ray de Araújo Sousa. Dissertação (mestrado) -Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018. 102 f.: il.

SOUZA, C. R. G. Praias arenosas oceânicas do estado de São Paulo (Brasil): síntese dos conhecimentos sobre morfodinâmica, sedimentologia, transporte costeiro e erosão costeira, **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, sem/v e s/n, p. 307-331, dez. 2012.

SOUZA, C.M.P.; COSTA, L.M.; MOREAU, A.M.S.S; GOMES, R. L. Sedimentological Parameters and Dating of Post-Barreiras Sediments from Region the Coastline. **Mercator**, Fortaleza, v.15, n.3, p.127-139, 2016a.

SOUZA, C.M.P.; COSTA, L.M.; MOREAU, A.M.S.S; GOMES, R. L. Sedimentological Parameters and Dating of Post-Barreiras Sediments from Region the Coastline. **Mercator**, Fortaleza, v.15, n.3, p.127-139, 2016a.

SOUZA, C.M.P; COSTA, L.M; GOMES, R. L.; MOREAU, A.M.S.S. Análise das áreas de ocorrência e características morfológicas de sedimentos "Pós-Barreiras" na região sul da Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.09, n.05, p. 1543-1557, 2016.

SOUZA, D. P. **Estudo Geoquímico-Mineralógico De Litologias Aflorantes Na Orla Litorânea De Icapuí – Ceará.** 95f. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SOUZA, D.C.; SÁ, E.F.J.; ANTUNES, A.F. Deformação neógena e suas implicações na estruturação dos campos de petróleo na região de Icapuí-Ponta Grossa (CE), Bacia Potiguar emersa. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 97-110, 2008.

SOUZA, E. M.; NEUMANN, V. H.; LIMA FILHO, M.; SILVA FILHO, C. A.; FARIAS, E. E. FRANÇA, E.J. Estratigrafia do Neógeno na Região Oeste da Planície do Recife, a partir de Sondagens na Cidade Universitária (Campus UFPE). **Estudos Geológicos**, Vol. 25 (2), p. 15-38, 2015.

STERRETT, K. **California Department of Boating and Waterways and State Coastal Conservancy**, 2002. California Beach Restoration Study. Sacramento, California, 2002. SUGUIO, K. **Dicionário De Geologia Marinha**: Com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol. T. A. Queiroz, São Paulo/SP, 1992.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Sedimentar e Áreas afins.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia.** São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1973.

SUGUIO, K. Tópicos De Geociências Para O Desenvolvimento Sustentável: As Regiões Litorâneas. **Revista do Instituto de Geociências**. USP. São Paulo. Geologia USP: Série Didática, v. 2, n. 1, 2003.

SUGUIO, K., NOGUEIRA, A.C.R. Revisão crítica dos conhecimentos geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu possível significado como testemunho de alguns eventos geológicos mundiais. São Paulo, **Revista Geociências**, V. 18, 9(2), p. 461-479, 1999.

SUGUIO, K.; MARTIN, L.; ABÍLIO, C.S.P. BITTENCOURT, J.M.L. DOMINGUEZ, J.F.; AZEVEDO, A.E.G. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 15, n. 4, p. 273-286, 1985.

SUNAMURA, T. **Geomorphology of Rocky Coasts**, Wiley, England, 302 p. 1992.

SUNAMURA, T.; TSUJIMOTO, H.; AOKI, H. The rock coast of Japan. **Geological Society**, London, Memoirs 40, p. 203–223, 2014.

SWIRAD, Z.M.; YOUNG, A. P. 2022. Spatial and temporal trends in California coastal cliff retreat. Spatial and temporal trends in California coastal cliff retreat. **Geomorphology**, Volume 412, 1 September 2022, 108318. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108318>

TATUMI, S. H.; SILVA, L.P.; PIRES, E.L.; ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; MUNITA, C.S. Datação de Sedimentos "Pós-Barreiras" no Norte do Brasil: implicações paleogeográficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 3, p. 514–524, 2008.

TATUMI, S.H., SILVA, L.P., PIRES, E.L., ROSSETTI, D.F., GÓES, A.M. Datação de Sedimentos "Pós-Barreiras" no norte do Brasil: implicações paleogeográficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 514–524, 2008.

TEREFENKO, P.; PAPROTNY, D.; GIZA, A.; MORALES-NÁPOLES, O.; KUBICKI, A.; WALCZAKIEWICZ, S. Monitoring Cliff Erosion with LiDAR Surveys and Bayesian Network-based Data Analysis. **Remote Sens.**, v. 11, p. 843, 2019.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Conditioning factors of coastal processes in the Brazilian Coastal Area. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, São Paulo, n. 17, p. 11-23, 2005.

TRENHAILE, A.S. **The Geomorphology of Rock Coast**. 344p. Oxford University Press, 1987.

TRENHILE AS. Rocky coasts – their role as depositional environments. **Earth Science Reviews**. V. 159, p. 1–13, 2016.

UNDP. United Nations Development Programme. Reducing Disaster Risk: **A Challenge for Development**. UNDP, 2004. Disponível em: <http://www.undp.org/bcpr>. Acesso em: 15 jan 2011.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, YONG. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**. V. 63, (2-3), p. 132-153, 2005.

VAN MEERBEECK, C. J.; RENSSSEN, H.; ROCH, D. M. How did Marine Isotope Stage 3 and Last Glacial Maximum climates differ? – Perspectives from equilibrium simulations. **Climate of the Past**, v. 5, p. 33–51, 2009.

WALLINGA, J.; MURRAY, A.; WINTLE, A. The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse – grain feldspar. **Radiation Measurements**, v. 32, issues 5-6, 15, p. 529 – 533, 2000.

WALLINGA, J.; MURRAY, A.; WINTLE, A. The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar, **Radiation Measurements**, 32, 5-6, 529-533, 2000.

WEHR, A. & LOHR, U. Airborne laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 68-82, 1999.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The Journal of Geology**. p. 377-392, 1922.

WETTERICH, S., KIZYAKOV, A., FRITZ, M., WOLTER, J., MOLLENHAUER, G., MEYER, H., FUCHS, M., AKSENOV, A., MATTHES, H., SCHIRRMEISTER, L., AND OPEL, T.: The cryostratigraphy of the Yedoma cliff of Sobo-Sise Island (Lena delta) reveals permafrost dynamics in the central Laptev Sea coastal region during the last 52 kyr, **The Cryosphere**, v. 14, p. 4525–4551, <https://doi.org/10.5194/tc-14-4525-2020>, 2020.

WRIGHT, L.D. & SHORT, A.D. Morphodynamic Variability of Surf Zones And beaches: A synthesis. **Marine Geology**. V. 56, issues 1-4, p. 93-118, 1984.

XIMENES NETO, A.R.; MOURA, F.M.; BRINDEIRO, O.S.; SILVA, R.R.; MACIEL, F.J.M.; MORAIS, J.O. **Caracterização Das Paleofalésias Na Planície Costeira Do Ceará, Nordeste Do Brasil**. 543 p IN: Roque et al., - Rio de Janeiro: FGEL –UERJ. Saindo Da Zona De Conforto: A Interdisciplinaridade Das Zonas Costeiras / Tomo VIII da Rede BRASPOR. Capítulo 14, 2019.

YOUNG, A.P. Decadal-scale coastal cliff retreat in southern and central California. **Geomorphology**, v. 300, p. 164–175, 2018.

YOUNG, A.P.; CARILLI, J.E. Global distribution of coastal cliffs. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 44, p. 1309–1316. 2019.