



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO E EVOLUÇÃO DE SISTEMAS DE ILHAS BARREIRAS
TROPICAIS NO LITORAL DE MACAU, ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE,
NE DO BRASIL**

Autor:

DHULYA RAFAELLY DAS CHAGAS ROCHA

Orientador:

PROF^a. DR^a. HELENICE VITAL

Dissertação nº 288/PPGG

Novembro de 2023
Natal/RN, Brasil

DHULYA RAFAELLY DAS CHAGAS ROCHA

**CARACTERIZAÇÃO E EVOLUÇÃO DE SISTEMAS DE ILHAS BARREIRAS
TROPICAIS NO LITORAL DE MACAU, ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE,
NE DO BRASIL**

Dissertação apresentada em 30 de novembro de 2023
ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e
Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte (UFRN) como requisito à obtenção
do Título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica,
Área de Concentração Geodinâmica.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Helenice Vital

Presidente e orientadora (PPGG-UFRN)

Prof^a. Dr^a. Mary Lucia da Silva Nogueira

Membro externo (UFRN)

Prof^a. Dr^a. Narelle Maia de Almeida

Membro externo (UFC)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Rocha, Dhulya Rafaelly das Chagas.

Caracterização e evolução de sistemas de ilhas barreiras tropicais no litoral de Macau, estado do Rio Grande do Norte, NE do Brasil / Dhulya Rafaelly das Chagas Rocha. - 2023.
98f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, RN, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Helenice Vital.

1. Geodinâmica - Dissertação. 2. Ilhas barreiras - Dissertação. 3. Pontais arenosos - Dissertação. 4. Testemunhos - Dissertação. 5. Batimetria - Dissertação. 6. Sequência sedimentar - Dissertação. I. Vital, Helenice. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.2/.3(043.3)

Dedico esse trabalho à minha família, que não mede esforços para me ajudar a alcançar meus objetivos, não há exemplo maior de dedicação do que a nossa família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e à minha família: minha mãe Júnia, meu pai Edilson, minha irmã Danielly, meus avós, tios e primos que são minha base, inspiração e fonte de incentivo e apoio. A todos os meus amigos que estiveram comigo no início da minha trajetória e no decorrer dela. Em especial aos amigos Adriano, Flora, Larissa e Richely que se fazem presentes desde a graduação. Ao meu companheiro de todas as horas, Hemerson Lucas, agradeço o cuidado, paciência, carinho, as palavras de incentivo e ações prestadas para ajudar nesse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de mestrado. A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), através do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), pelo suporte financeiro e infraestrutura disponibilizada nos seus diferentes laboratórios, em especial, o Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA), Laboratório de Geografia Física (LabGeoFis/DGEO), Laboratório de Análise Ambiental (MCC), Laboratório de Sedimentologia (DG), e o Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos (NUPPRAR).

Aos companheiros do GGEMMA: Luan, Sarah, Yasmym, Raissa, Filipe, João Paulo, Thiago, e todos os outros que fazem parte da equipe pelas discussões e companheirismo. À minha orientadora Professora Helenice Vital, por todos os ensinamentos e apoio.

À PETROBRAS (UO/RNCE) pelo acesso aos testemunhos para a realização deste estudo. Aos projetos Mapeamento da Margem Equatorial Brasileira (CNPq /2020-8) e SeabedMap (FINEP/MCTI) pelo suporte financeiro. Dissertação desenvolvida no âmbito do INCT Ambtropic.

Por fim, às pessoas que não foram nomeadas aqui, mas que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho e desenvolvimento pessoal ao longo desses anos.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

(Santa Teresa de Calcutá)

RESUMO

A costa norte do estado do Rio Grande do Norte é classificada como uma costa tropical de energia mista sob atuação de uma intensa dinâmica costeira. Neste contexto se destaca a presença de sistemas de ilhas barreiras – pontais arenosos, membros finais de corpos arenosos dispostos paralelamente à linha de costa, que isolam áreas protegidas do impacto do mar aberto. Estes sistemas destacam-se por apresentarem em seu lado marinho e terrestre diferentes depósitos sedimentares. Nessa perspectiva, a caracterização e análise desses sistemas, tendo o conhecimento sobre os processos que atuam nestes ambientes e sua configuração sedimentar/estratigráfica é de suma importância tanto para estudos ambientais como de análogos de reservatórios de óleo e gás. O presente estudo teve como principal objetivo a caracterização dos sistemas de ilhas barreiras/pontais arenosos do litoral setentrional do estado, próximo a cidade de Macau/RN. Foram utilizados dados de batimetria dos canais de maré, amostras de superfície e testemunhos, coletados nos sub-ambientes do sistema ilhas barreiras/pontais arenosos. Os resultados mostraram canais de maré com profundidades entre 1,3 e -6,3 m, e calha principal em formato de “U”; foram identificados bancos areno/lamosos nas margens do canal, além de áreas com dunas subaquáticas 2D e 3D, pequenas a grandes. As associações de fácies sedimentares interpretadas nos testemunhos foram relacionadas a depósitos de canais de maré, planície de maré, barra de pontal do canal de maré, praia/ilha barreira, areia eólica e depósitos de sobrelavagem. A semelhança entre as características das amostras de superfície e as fácies descritas nos testemunhos, auxiliou na interpretação do subambiente associado a cada uma das associações de fácies.

Palavras-chave: ILHAS BARREIRAS; PONTAIS ARENOSOS; TESTEMUNHOS; BATIMETRIA; SEQUÊNCIA SEDIMENTAR.

ABSTRACT

The northern coast of the state of Rio Grande do Norte is classified as a mixed-energy tropical coast and presents a very intense coastal dynamic. Within this context is outstanding the presence of barrier island-spits system, end members of sandy bodies parallel to the coastline, which isolate protected areas from the impact of the open sea. The barrier island-spits systems stand out for having different sedimentary deposits on their marine and terrestrial sides. In this perspective, the characterization and analysis of this system, having the knowledge about the processes that act in these environments and their sedimentary/stratigraphic configuration is of utmost importance for both environmental studies and oil and gas reservoir analogues. The main objective of this study was the characterization of the barrier island-spit systems of the northern coastline of the state, near the city of Macau, RN. The research includes data from bathymetry of tidal channels, surface samples and vibracores collected from sub-environments of the barrier island-spit system. The results indicated channels with depths ranging from 1.3 to -6.3 meters, and the main channel having a 'U' shape. Sandy/muddy banks were identified along the channel margins, as well as two areas featuring 2D and 3D underwater dunes, varying in size from small to large. Six sedimentary facies association interpreted in the cores were associated with tidal channel deposits, tidal flat, tidal inlet shoal, beach/barrier island, aeolian sand and washover. The similarity between the features of the surface samples and the facies described in the cores assisted in the interpretation of the sub-environment associated with each facies association.

Key words: BARRIER ISLANDS; SPITS; CORES; BATHYMETRY; SEDIMENTARY SEQUENCE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.	18
Figura 2: Tipos de barreiras costeiras. A - Barreira parcialmente conectada à terra (Pontal arenoso); B - Barreira totalmente unida ao continente, envolvendo uma lagoa; C - Barreira isolada formando ilha barreira.	19
Figura 3: Interação dos fatores primários que controlam o movimento da linha de costa e a morfodinâmica costeira. As setas apontam para as variáveis dependentes. Fonte: Morton (1977).	20
Figura 4: Sistema de ilhas barreiras: os seis ambientes interativos. Fonte: Oertel (1985).	21
Figura 5: Modelos estratigráficos generalizados de resposta costeira para sistemas de barreira transgressiva, progradação e agradadação devido a mudanças no nível relativo do mar, balanço de sedimentos, processos costeiros e/ou outros fatores. Fonte: Galloway e Hobday (1975).	22
Figura 6: Mapa de compartimentação do litoral setentrional do estado apresentando os dois principais sistemas de falhas que influenciam na distribuição de ilhas barreiras e pontais arenosos. Fonte: Valentim da Silva (2008).	23
Figura 7: Estágios principais que caracterizam o modelo evolutivo das barreiras costeiras no Litoral Norte do Rio Grande do Norte (A) litoral por volta de 120.000 AP; (B) configuração da linha de costa em torno de 5.900 anos AP, quando os sistemas de ilhas barreiras se distribuíam além da região entre os sistemas de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra; (C) litoral por volta de 3.600 anos AP, já com a presença das falhas limitando a distribuição dos sistemas de ilhas barreiras; (D) litoral atual (baseado em Silva 1991, Fonseca 1996, Caldas 2002). Fonte: Vital (2009).	24
Figura 8: Mapa geológico simplificado da porção emersa da Bacia Potiguar (modificado de Cassab 2003, Angelim et al. 2006). Fonte: Santos (2013).	26
Figura 9: Carta estratigráfica da Bacia Potiguar. Fonte: Pessoa Neto et al. (2007).	27
Figura 10: Mapa geológico simplificado da área de estudo.	28
Figura 11: Temperatura média mensal (2017) e Normais Médias Mensais de Temperatura (°C) (1961-1990; 1981-2010). Fonte: INMET.	30
Figura 12: Precipitação acumulada mensal (2017) e Normais Médias Mensais de Precipitação (mm) (1961-1990; 1981-2010). Fonte: INMET.	31
Figura 13: A - Velocidade média e direção do Vento (m/s); B - Direção dos ventos predominantes na área de estudo segundo a Normal Climatológica de 1961-1990 da Estação Climatológica Convencional de Macau/RN. Fonte: INMET.	32
Figura 14: Curva de maré para de abril de 2018 da região de Macau/RN a partir de dados da Tábua de Maré.	34
Figura 15: Fluxograma adotado no presente trabalho.	35
Figura 16: Mapa de localização dos pontos amostrados e das linhas batimétricas.	36
Figura 17: A – Antena GPS acoplada em tubo de aço na embarcação; B – Receptor GPS; C – Tubo de aço utilizado para acoplar o sonar; D - Sonar interferométrico 4600 EdgeTech. Fonte: Silva (2017)..	37
Figura 18: A - Tubo de alumínio utilizado na sondagem por vibração; B - Vista do tripé e testemunho coletado na área CPrI1; C - Retirada do testemunho com uso da talha; D - Sondagem na área de referência em Frente a Diogo Lopes (RM), com posicionamento dos 3 testemunhos. Fonte: Vital et al. (2018a).	39
Figura 19: A - Embarcação utilizada para o deslocamento nos canais de maré; B - Coletor de material e amostra acondicionada em saco plástico; C - Lançamento do amostrador van Veen na água; D - Recuperação do sedimento coletado pelo van Veen.	40
Figura 20: Fluxograma do processamento de dados batimétricos.	41

Figura 21: A - Testemunhos marcados a intervalos regulares para amostragem. Fonte: Vital et al. (2018b); B - Lavagem dos sedimentos nos béqueres; C - Estufa utilizada para secagem dos sedimentos; D - Amostra quarteada; E - Separação do material destinado para determinação do teor de carbonato.	43
Figura 22: A - Conjunto de peneiras posicionado no agitador; B - Béqueres com 5g da amostra de sedimento mais 20 ml de ácido clorídrico (HCl) a 10%; C - Filtros e funis utilizados na lavagem das amostras para retirada do HCl. Fonte: Rocha (2021); D - Cadinhos na mufla. Fonte: Vital et al. (2018b).	44
Figura 23: Analisador de tamanho de partícula por difração a laser Microtrac S3500.	45
Figura 24: Esquema dos parâmetros geométricos das dunas: H - altura da duna; L - comprimento; L1 e L2 - comprimento da projeção horizontal dos flancos (lado 1 e lado 2)..	47
Figura 25: Mapa batimétrico dos canais de maré.....	48
Figura 26: Perfis batimétricos transversais à calha dos canais de maré.	49
Figura 27: Dunas subaquáticas nos canais de maré de Diogo Lopes. A - Área 1; B - Área 2.	50
Figura 28: Perfis batimétricos analisados na Área 1.	51
Figura 29: Perfis batimétricos analisados na Área 2.	53
Figura 30: Visualização do local e do material das amostras DL-01 A e B.....	55
Figura 31: Visualização do local e do material da amostra DL-02.	55
Figura 32: Visualização do local e do material da amostra DL-03.	56
Figura 33: Visualização do local e do material da amostra DL-04.	56
Figura 34: Visualização do local e do material da amostra DL-05.	57
Figura 35: Visualização do local e do material da amostra DL-06.	57
Figura 36: Visualização do local e do material das amostras DL-07 e DL-08.....	58
Figura 37: Visualização do local e do material das amostras DL-09 A e B.....	59
Figura 38: Visualização do local e do material das amostras DL-10 A e B.....	60
Figura 39: Carta de análise sedimentológica para o testemunho ARPrI A, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	63
Figura 40: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CPrI1 B, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	64
Figura 41: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CPrI2 B, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	65
Figura 42: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CPrI3 A, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	66
Figura 43: Carta de análise sedimentológica para o testemunho SM-6, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama.	67
Figura 44: Carta de análise sedimentológica para o testemunho ARM B, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	68
Figura 45: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CM1 C, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	69
Figura 46: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CM2 A, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	71
Figura 47: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CM3 C, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.	72

Figura 48: Carta de análise sedimentológica para o testemunho SM-10, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama.....	73
Figura 49: Evolução dos testemunhos ARPrI e CPrI 1, com a presença de depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos de ilha barreira/pontal arenoso.....	78
Figura 50: Evolução dos testemunhos CPrI 2, apenas com depósito de ilha barreira/pontal arenoso preservado.	79
Figura 51: Evolução dos testemunhos CM 1, com a presença de depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos de ilha barreira/pontal arenoso e no topo depósitos de uma região mais protegida.....	80
Figura 52: Evolução dos testemunhos CPrI 3, com a presença de depósitos de sobrelavagem na base, sobreposto por depósitos de areia eólica.	82
Figura 53: Evolução dos testemunhos CM 2, com a presença de depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos arenoso de barra de pontal de canal de maré.	83
Figura 54: Evolução dos testemunhos ARM e CM3, com a preservação apenas de depósitos de planície de maré.	84
Figura 55: Evolução entre os anos de 1961 e 2018 do sistema Tubarão/Fernandez mostrando as mudanças que ocorrem no sistema de ilhas barreiras/pontais arenosos e canais de maré. Fonte: Silva e Vital (2019).	85
Figura 56: Disposição lateral dos testemunhos CPrI 1, SM-6 e ARPrI.	87
Figura 57: Disposição lateral dos testemunhos CM 2, CM 3, SM-10 e ARM.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Esquema de Classificação de formas de fundo proposto por Ashley (1990).	47
Tabela 2: Parâmetros morfológicos com base nos dados batimétricos da Área 1.....	52
Tabela 3: Parâmetros morfológicos com base nos dados batimétricos da Área 2.....	54
Tabela 4: Características e classificação das amostras de superfície e fundo de canal.	61

LISTA DE SIGLAS

AI – Índice de Assimetria

ANA – Agência Nacional das Águas

AP – Antes do presente

Az – Azimute

CaCO₃ – carbonato de cálcio

E – Leste

E.G – Por exemplo

GGEMMA - Laboratório de Pesquisa em Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental

HCl – ácido clorídrico

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

NE – Nordeste

NUPPRAR - Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos

NW – Noroeste

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organizações das Nações Unidas

RI – Índice de Ondulação

RN – Rio Grande do Norte

SAG - Sistema de Análise Granulométrica

SE – Sudeste

SW – Sudoeste

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 SISTEMAS DE ILHAS BARREIRAS-PONTAIS ARENOSOS	18
2.1.1 Sistemas de Ilhas Barreiras-Pontais Arenosos no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte	22
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	26
3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL	28
3.2.1 Depósitos Flúvio-Marinhos	28
3.2.2 Depósitos de Mangue	29
3.2.3 Depósitos eólicos litorâneos vegetados	29
3.2.4 Depósitos eólicos litorâneos não vegetados	29
3.2.5 Depósitos Litorâneos Praiais	29
3.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	30
3.3.1 Clima	30
3.3.2 Ventos	31
3.3.3 Hidrografia	32
3.3.4 Vegetação	32
3.4 PROCESSOS COSTEIROS	33
3.4.1 Ondas	33
3.4.2 Correntes	33
3.4.3 Marés	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	35
4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO	35
4.2.1 Coleta de dados batimétricos	36
4.2.2 Coleta de testemunhos	37
4.2.3 Coleta de amostras de superfície e fundo de canal	39
4.3 ATIVIDADES EM LABORATÓRIO	40
4.3.1 Processamento dos dados batimétricos	40
4.3.2 Processamento dos testemunhos	41
4.3.2.1 Análise granulométrica	42

4.3.2.2 Teor de Carbonato de Cálcio	43
4.3.2.3 Teor de Matéria Orgânica	44
4.3.2.4 Análise morfooscópica e minaralógica	44
4.3.3 Processamento das amostras de superfície e fundo de canal	45
4.4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 BATIMETRIA MULTIFEIXE.....	47
5.2 SEDIMENTOS DE SUPERFÍCIE E FUNDO DE CANAL.....	54
5.3 TESTEMUNHOS.....	62
5.3.1 Associações de Fácies	73
5.4 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO	77
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO	98

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Ambientes de sedimentação costeiros se encontram localizados na zona de transição entre o continente e o oceano. Os processos sedimentares associados à erosão e deposição, nesses ambientes, são resultado de fatores naturais (climáticos, oceanográficos e geológicos) e antrópicos, com diferentes escalas de atuação (local, regional e global) (Silva 2008).

Os fatores climáticos e oceanográficos são responsáveis pela atuação das ondas, correntes costeiras, marés e pelas variações do nível do mar. Os fatores geológicos determinam a fisiografia da planície costeira, as fontes de sedimentos para a zona costeira e podem influenciar na posição da linha de costa e na ocorrência de zonas propícias ao acúmulo de sedimentos, através de um controle estrutural. Devido esses diferentes processos atuantes, a região costeira apresenta uma morfologia bastante variável, relacionada com os diferentes tipos de depósitos sedimentares que se encontram distribuídos nessa região.

Nesse contexto, destaca-se no litoral setentrional do Rio Grande do Norte a presença de corpos arenosos dispostos paralelamente à linha de costa, isolando áreas protegidas do impacto do mar aberto, constituindo sistemas dinâmicos desde ilhas barreiras a pontais arenosos. A costa norte do estado é classificada como tropical de energia mista e apresenta dentro do sistema de ilhas barreiras – pontais arenosos, depósitos de dunas, canais de maré, deltas de maré vazante, planícies de maré e manguezais.

Nessa área, a intensa dinâmica costeira atuante provoca erosão em alguns pontos, acreção em outros, podendo levar à abertura e fechamento de canais de maré em um curto período de tempo. Na região são encontradas instalações da indústria petrolífera que são afetadas pelos processos costeiros, cuja dinâmica existente na área tem provocado erosão em locais onde foram instaladas facilidades destinadas ao apoio logístico para a produção de petróleo, como estrada de acesso, bases de locação de poços e bases de apoio. Em função dos processos marinhos reinantes na área, o material erodido dessas instalações pode ser transportado em direção ao continente (com deposição em manguezal ou sedimentos praias adjacentes), ou em direção ao mar. Essa característica da região proporcionou o desenvolvimento de vários estudos.

Dentro dessa perspectiva, a caracterização e análise desse tipo depósito, com o conhecimento sobre os processos que atuam nestes ambientes e sua configuração sedimentar/estratigráfica é de suma importância tanto para estudos de análogos de reservatórios de óleo e gás, quanto ambientais. Ao se estudar as fácies de ambientes modernos é possível criar modelos desses ambientes e correlacioná-los com a sísmica, dados de poços, associações

litológicas, de fácies, geometria e dessa forma interpretar sistemas e ambientes importantes no sistema petrolífero.

Além disso, é importante destacar a importância da pesquisa para atender os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da agenda 2030 da Organizações das Nações Unidas (ONU) 4 (Educação de Qualidade), 5 (Igualdade de Gênero), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), 14 (Vida na Água), 17 (Parcerias e Meios de Implementação).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo principal o estudo de sistemas ilhas barreiras tropicais, através da análise de sequências verticais de depósitos sedimentares, bem como caracterização do fundo de canais de maré da região estudada, através da batimetria multifeixe.

Como objetivos específicos foram realizados:

- i) análise batimétrica dos canais de maré;
- ii) análise de amostras de depósitos atuais;
- iii) análise estratigráfica de testemunhos;
- iv) elaboração de modelo da história evolutiva para ilhas barreiras tropicais mesomaré.

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se localiza no litoral setentrional do Rio Grande do Norte, em uma região de ilhas barreiras-pontais arenosos, situada no município de Macau/RN, entre a sede municipal de Macau e o distrito de Diogo Lopes (Figura 1). O município de Macau está a aproximadamente 185 km da capital do estado (Natal/RN). O acesso à área de estudo pode ser feito pela BR-406 (Rodovia Federal) até a sede municipal de Macau e através da RN-403 (Rodovia Estadual) para as localidades de Barreiras e Diogo Lopes, onde os dados foram coletados.



Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMAS DE ILHAS BARREIRAS-PONTAIS ARENOSOS

No ambiente costeiro são encontrados diferentes tipos de depósitos sedimentares, conferindo à costa uma morfologia variável, moldada por fatores climáticos, oceanográficos, geológicos e antrópicos. Um dos principais depósitos encontrados nessa região são as praias, que de acordo com Della Fávera (2001), podem ser divididas em dois tipos: praias anexas ao continente e ilhas barreiras, ambos com um perfil característico de sucessão vertical com granocrescência ascendente.

As barreiras de sedimentos, que se desenvolvem ao longo de algumas costas, separam o mar aberto da região que fica entre a barreira e a planície costeira. Essas barreiras podem ser parcialmente unidas à terra, formando um pontal arenoso (*spit*), totalmente unida ao continente, como uma barreira que envolve completamente uma lagoa, ou podem ser isoladas como uma ilha barreira na frente de uma lagoa (Nichols 2009) (Figura 2).

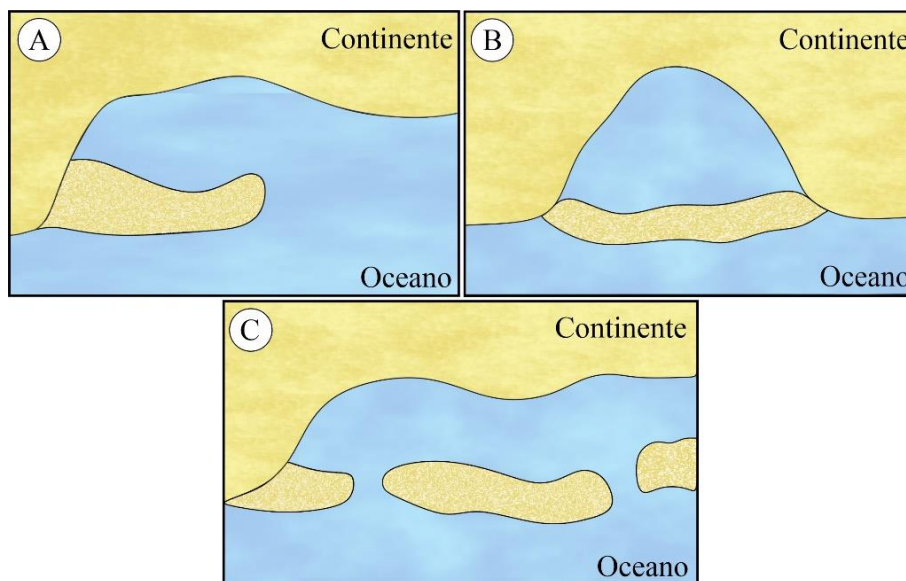


Figura 2: Tipos de barreiras costeiras. A - Barreira parcialmente conectada à terra (Pontal arenoso); B - Barreira totalmente unida ao continente, envolvendo uma lagoa; C - Barreira isolada formando ilha barreira.

Suguio (1980) define ilha barreira como um corpo arenoso linear, exposto durante a maré alta, disposto paralelamente à linha de costa, que isola áreas protegidas (baías, lagoas e planícies de maré) do impacto do mar aberto.

Um pontal arenoso é uma forma de deposição costeira que prograda lateralmente e que se estende de um continente ou promontório em águas abertas ao longo da costa externa e consiste principalmente de sedimentos não consolidados transportados e depositados principalmente pelo transporte de sedimentos ao longo da costa (McBride et al. 2013).

A origem das ilhas barreiras é um assunto controverso, de acordo com Walker (1984) existem 3 hipóteses principais: i) construção a partir de barras submarinas; ii) progradação do pontal arenoso paralelo à costa e segmentação por canais; iii) submersão de faixas de praias costeiras.

A modificação extensiva e a evolução das ilhas barreiras modernas têm ocorrido desde o início do Holoceno, através de uma combinação de processos, incluindo segmentação e preenchimento de canais, deposição de leques de lavagem e transporte através da costa (Field & Duane 1976). O desenvolvimento dessas ilhas barreiras é controlado por uma série de fatores, Morton (1977) apontou cinco fatores que causam o movimento da linha de costa: nível relativo do mar, processos costeiros, clima, balanço sedimentar e atividades humanas (Figura 3). Esses fatores desempenham um papel central no controle da morfodinâmica costeira dos sistemas de barreiras e determinam se o sistema migra para a terra ou para o mar, ou permanece estacionário.

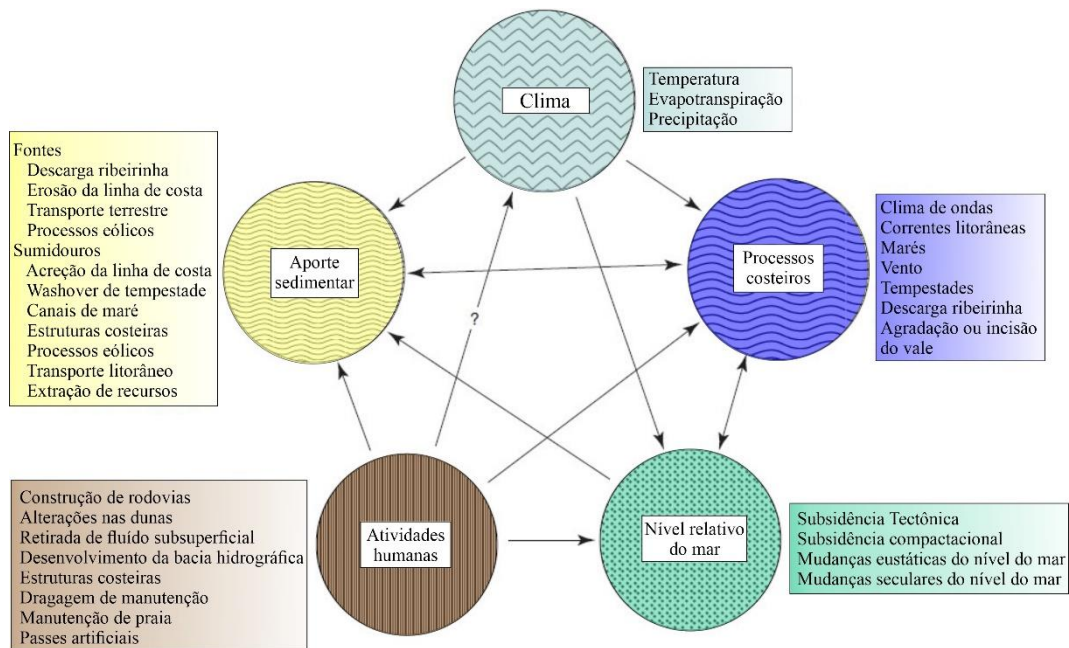


Figura 3: Interação dos fatores primários que controlam o movimento da linha de costa e a morfodinâmica costeira. As setas apontam para as variáveis dependentes. Fonte: Morton (1977).

As ilhas barreiras compreendem 10% das costas modernas (Stutz & Pilkey 2011; Mulhern et al. 2021), o que as torna características costeiras proeminentes. As barreiras variam em tamanho de menos de 100 m de largura a vários quilômetros e seu comprimento varia de algumas centenas de metros a muitas dezenas de quilômetros (Davis & Fitzgerald 2004; Nichols 2009). A margem de uma ilha barreira, voltada para o mar, apresenta uma praia, e geralmente uma crista de dunas de praia, onde os processos eólicos retrabalham a areia (Nichols 2009). Enquanto seu lado terrestre é composto por vários ambientes, incluindo planícies de maré, pântanos ou leques de lavagem.

Oertel (1985) definiu um sistema de ilhas barreiras como tendo seis componentes necessários, conforme ilustra a Figura 4: (1) continente; (2) estuário (*e.g.* lagoa, pântano, baía); (3) entradas de maré e deltas de maré (enchente e vazante); (4) ilha barreira; (5) plataforma de barreira e (6) *shoreface*. Esse sistema é composto por três grandes sistemas deposicionais clásticos: 1) o complexo barreira-praia submaré a subaéreo 2) a região atrás da barreira ou lagoa submaré-intermaré, e 3) o delta submaré-intermaré e o complexo de canais de maré (Walker 1984).

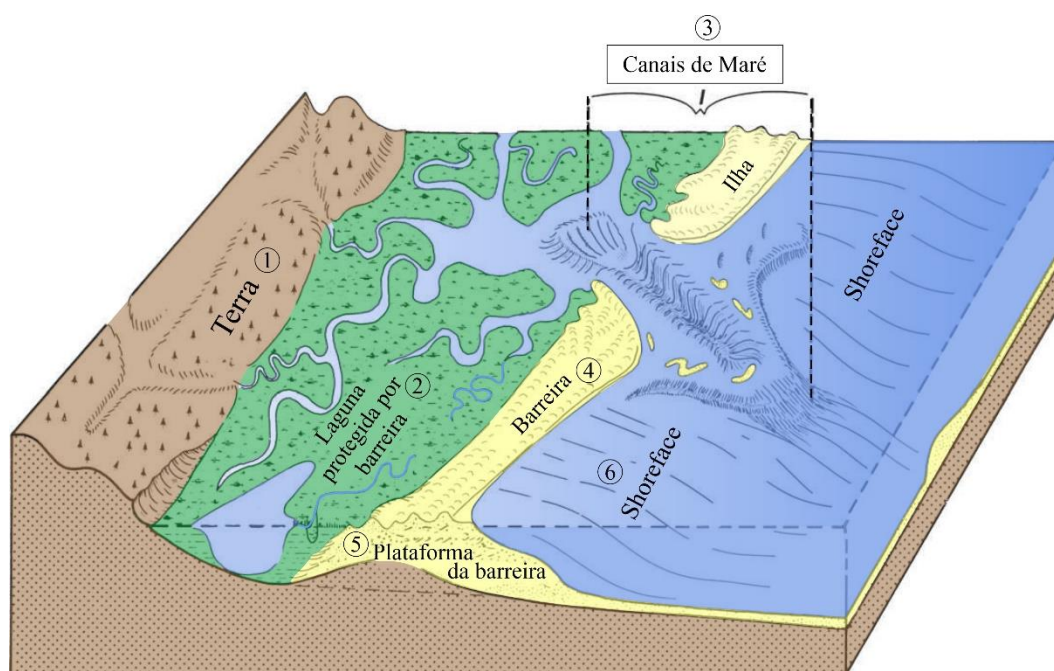


Figura 4: Sistema de ilhas barreiras: os seis ambientes interativos. Fonte: Oertel (1985).

A presença de matéria orgânica nesse sistema pode ser abundante a partir da vegetação que se desenvolve na margem das lagoas. Em regiões de clima tropical são comumente encontrados os manguezais (ecossistema costeiro com árvores que possuem sistemas de raízes aéreas) ocupando as partes rasas das lagoas. Segundo Nichols (2009), os manguezais favorecem a progradação da linha de costa em direção à lagoa, pois atuam como locais de acúmulo de sedimentos e matéria orgânica ao longo das margens.

De acordo com McBride et al. (2013), os sistemas de ilhas barreiras são classificados em modelos estratigráficos generalizados com base na resposta da linha de costa, e estes são conhecidos como transgressivos (retrogradacionais), regressivos (progradacionais) e agradacionais (acrecção vertical) (Figura 5), que também tendem a resumir a morfodinâmica geral da linha de costa da barreira. Muitas vezes, ao longo da história geológica de uma ilha barreira, um sistema pode apresentar períodos de mais de uma dessas classificações dependendo da interação dos mecanismos das forças.

As mudanças de curto prazo no registro sedimentar são registradas em uma história mais longa da dinâmica ilha barreira através da estratigrafia da região (McBride 2013). O desenvolvimento humano e as obras de engenharia costeira vêm se tornando uma força dominante na modificação da evolução das ilhas barreiras. O conflito entre os seres humanos e os processos naturais só aumenta durante a atividade das tempestades, particularmente durante os períodos de elevação do nível do mar (McBride 2013). Estudos sobre o sistema de ilhas barreiras podem ser utilizados para melhor embasar os gestores das zonas costeiras nos seus processos de tomada de decisão nas zonas povoadas, além de que, uma melhor avaliação dos

pântanos/manguezais e sistemas lagunares permite uma melhor avaliação dos recursos orgânicos no local.

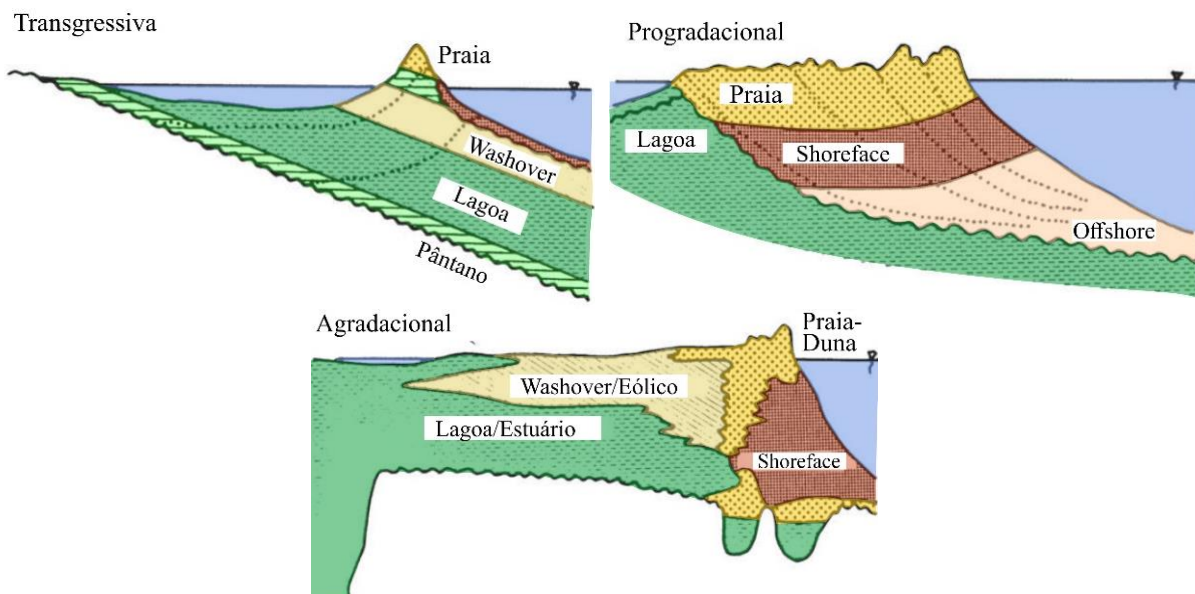


Figura 5: Modelos estratigráficos generalizados de resposta costeira para sistemas de barreira transgressiva, progradacional e agradacional devido a mudanças no nível relativo do mar, balanço de sedimentos, processos costeiros e/ou outros fatores. Fonte: Galloway e Hobday (1975).

2.1.1 Sistemas de Ilhas Barreiras-Pontais Arenosos no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte

Com relação à costa do estado do Rio Grande do Norte, segundo Vital (2009), os pontais arenosos e ilhas barreiras estão restritos ao litoral setentrional do estado, confinados entre dois sistemas de falhas principais, os sistemas de Carnaubais (NW) e de Afonso Bezerra (NE) (Figura 6). No entanto, no passado, as ilhas barreiras eram encontradas ao longo de todo litoral setentrional (Vital et al. 2003, 2008, 2016; Vital 2009).

Associados a esse sistema ilhas barreiras/pontais arenosos desenvolvem-se canais de maré cuja principal força são as correntes de maré de enchente e vazante que, segundo Costa Neto (2009), são levemente assimétricas para o componente de vazante. Os canais de maré da área de estudo são curvilíneos, relativamente estreitos (máximo 500 m) e rasos (profundidades < 12 m, mesmo durante as grandes sizígias) (Silva 2019).

Nas desembocaduras os processos de transporte sedimentar litorâneo (correntes de marés e correntes geradas por ondas) são responsáveis pela variação da profundidade dos canais ao longo do tempo e pelo desenvolvimento de feições sedimentares paralelas ou perpendiculares à costa. Exemplos de feições perpendiculares à costa são os deltas de maré, que apresentam um relevo plano a suavemente ondulado e afloram durante o período de baixa-mar, sendo constituídos por lamas e areias lamosas de composição quartzosa e biodetrítica, mal selecionadas e de origem flúvio-estuarina-costeira (Vital et al. 2013). Os deltas de maré vazante

são mais comumente encontrados na área de estudo e sofrem modificações constantes na sua forma em função principalmente da variação das correntes e da amplitude da maré. Deltas de maré enchente, embora também possam ser formados, são feições mais efêmeras devido à maior eficácia das correntes de maré vazante.

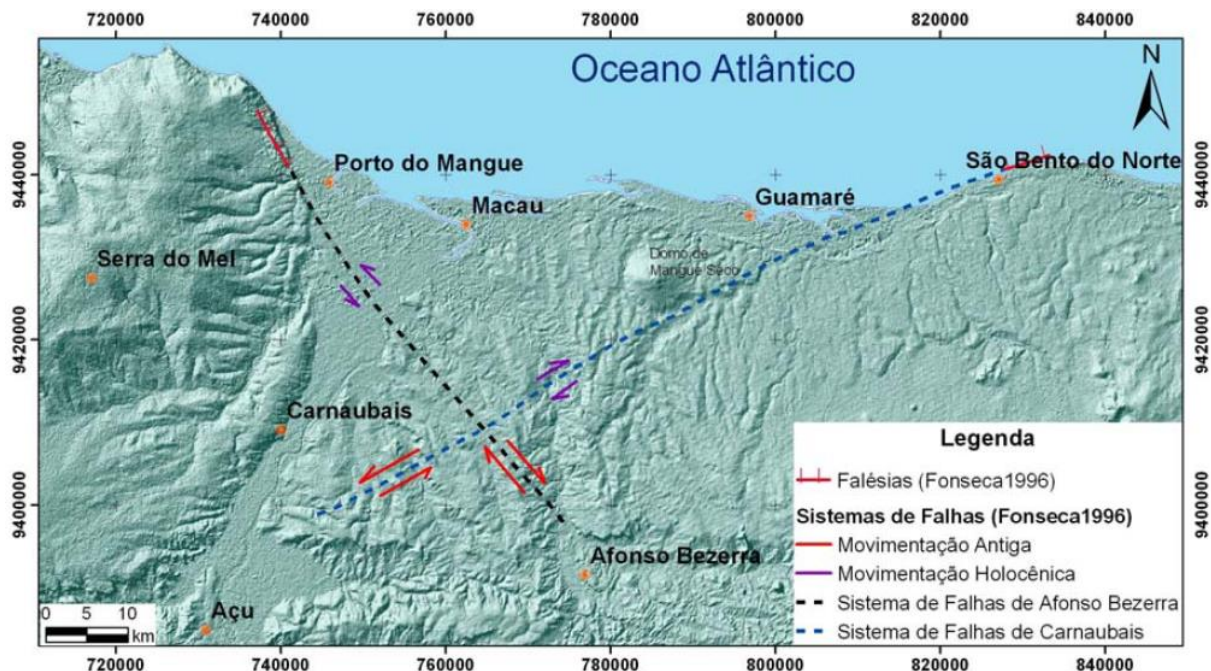


Figura 6: Mapa de compartimentação do litoral setentrional do estado apresentando os dois principais sistemas de falhas que influenciam na distribuição de ilhas barreiras e pontais arenosos. Fonte: Valentim da Silva (2008).

As ilhas barreiras e pontais arenosos apresentam migração para oeste, devido à ação da intensa deriva litorânea neste sentido. A evolução das ilhas barreiras modernas têm ocorrido desde o início do Holoceno e de maneira cíclica, onde se tem um antigo sistema de ilhas barreiras desenvolvendo pontais arenosos atuais e pontais arenosos que foram recentemente separados do continente para formar ilhas barreiras (Xavier Neto et al. 2001, Lima et al. 2001, 2002, Vital 2009).

De acordo com Silva (2019), datações em arenitos praias (*beachrocks*) funcionam como indicadores dos episódios transgressivos e regressivos. Dessa forma, permitem reconstruir os estágios de evolução das barreiras costeiras do litoral norte do estado (Figura 7). De acordo com o autor supracitado, observam-se 3 principais grupos de datações: 120.000 anos AP – correlata a Transgressão Cananéia; 6.500 a 5.900 anos AP – correlato ao máximo transgressivo holocênico; e 4.000 a 2.200 anos AP – correlata ao último grande episódio regressivo (Bezerra et al. 1998, Bezerra et al. 2003, Caldas et al. 2006, Stattegger et al. 2006).

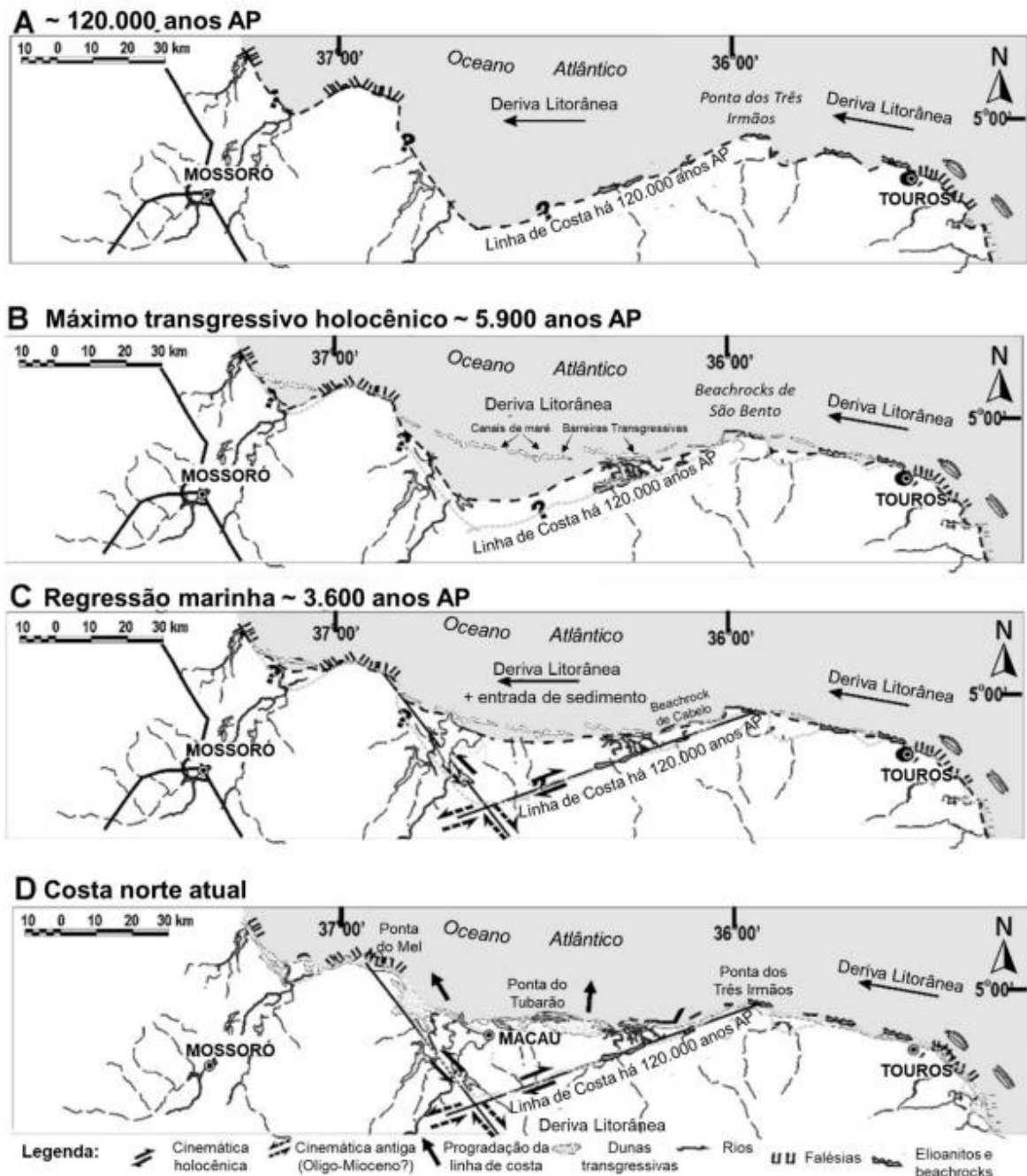


Figura 7: Estágios principais que caracterizam o modelo evolutivo das barreiras costeiras no Litoral Norte do Rio Grande do Norte (A) litoral por volta de 120.000 AP; (B) configuração da linha de costa em torno de 5.900 anos AP, quando os sistemas de ilhas barreiras se distribuíam além da região entre os sistemas de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra; (C) litoral por volta de 3.600 anos AP, já com a presença das falhas limitando a distribuição dos sistemas de ilhas barreiras; (D) litoral atual (baseado em Silva 1991, Fonseca 1996, Caldas 2002). Fonte: Vital (2009).

Os sistemas ilhas barreiras e pontais arenosos são constituídos por sedimentos arenosos e frequentemente recobertos por dunas. De acordo com Silva & Vital (2019), atualmente são encontrados três pontais: Galinhos, Minhoto e Soledade; e as ilhas barreiras correspondem a Presídio, Amaro, Fernandez, Tubarão, Corta Cachorro (Pontal dos Anjos) e Camapum.

Devido à complexidade de distinção e a alternância temporal entre ilhas barreiras e pontais arenosos, de acordo com Silva & Vital (2019), convencionou-se que o termo barreiras de

mesomaré, como foi utilizado por Vital (2009), representaria de modo mais completo e menos confuso essas feições.

As ilhas barreiras do litoral norte do Rio Grande do Norte (RN), ganharam os palcos das ciências costeiras no início dos anos 2000, quando a intensa dinâmica local se tornou um fator de risco para os campos de produção de petróleo situados ao longo da costa (Vital et al. 2003, 2004, 2006, Chaves et al. 2006, Silva & Vital 2019). Desde então essa área foi alvo de diversos trabalhos (e.g. Vital et al. 2003, 2006; Grigio et al. 2005; Castro et al. 2011; Franco et al. 2012; Rios et al. 2016; Ferreira 2020; Ferreira et al. 2022).

Em trabalhos mais recentes, Silva & Vital (2019) abordam a morfodinâmica dos sistemas de ilhas barreiras do litoral norte do estado, subdividindo-as em dois grupos, as migrantes, que incluiu todas as barreiras com variação considerável na posição ao longo do tempo, e as estacionárias, que representavam todas com uma posição determinada em todos os momentos. Mascena (2020), Rocha (2021), Rocha et al. (2021) e Miranda (2021) trouxeram, através de análises sedimentares e estatísticas, informações sedimentológicas e ambientais quanto a contaminação por material de empréstimo e acerca da distribuição de fácies de ambientes de ilha barreira e manguezais próximo ao Campo de Serra, nas proximidades de Macau/RN. Entretanto, estudos com uma visão abrangente da área, integrando os diversos trabalhos já efetuados em diferentes ilhas barreiras dessa região ainda não foram realizados, e estudos de análogos de reservatórios de óleo e gás são ainda incipientes.

Dentro desse contexto, destaca-se a Formação Açú-4, unidade da Bacia Potiguar que é correlacionada ao sistema de ilhas barreiras/pontais arenosos. A partir de dados de análises de perfis elétricos e correlação com afloramentos e testemunhos, Vasconcelos et al. (1990) propôs uma subdivisão em quatro unidades litológicas informais para a Formação Açú. As Unidades Açú-1, Açú-2 e Açú-3 apresentam rochas depositadas em sistemas de leques aluviais, fluvial entrelaçado e meandrante. A Unidade Açú-4, também conhecida por Membro Mossoró, que representa o início do afogamento do sistema fluvio-aluvial, é caracterizada por argilitos, folhelhos, siltitos, arenitos muito finos a médios e eventuais calcilutitos e margas dolomitizadas (Vasconcelos et al. 1990), interpretadas como rochas depositadas em um sistema costeiro, estuarino a marinho raso, com desenvolvimento de ilhas barreiras cortadas por canais de maré com laguna na retaguarda.

Estudos de afloramentos de depósitos sedimentares como análogos de reservatórios óleo e gás são importantes para a compreensão e predição das condições e comportamento de uma seção rochosa, reservatório de petróleo, em subsuperfície, visando reduzir custos e otimizar a exploração.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

No contexto geológico regional a área de estudo está inserida na porção central da Bacia Potiguar emersa, sendo recoberta por depósitos sedimentares mais recentes.

A Bacia Potiguar é uma bacia de margem passiva localizada na porção oriental do nordeste do Brasil, abrangendo o estado do Rio Grande do Norte e menos expressivamente o estado do Ceará (porção ocidental) (Figura 8). A bacia limita-se a norte pela isóbata de 2.000 m, a leste com a Alto de Touros, a sul com o embasamento cristalino e a oeste com a Bacia do Ceará pelo Alto de Fortaleza. Em sua área de aproximadamente 48.000 km², 45% da cobertura sedimentar, que corresponde a 21.500 km², se encontra emersa, enquanto 55% (26.500 km²) corresponde a porção submersa (Pessoa Neto et al. 2007).

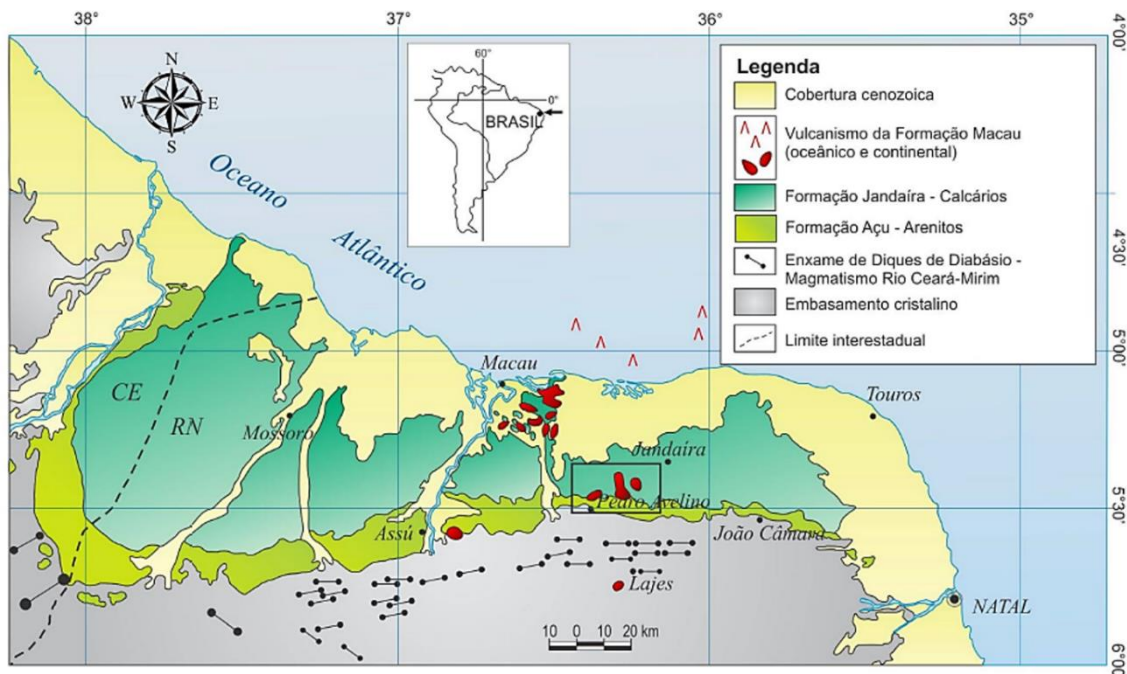


Figura 8: Mapa geológico simplificado da porção emersa da Bacia Potiguar (modificado de Cassab 2003, Angelim et al. 2006). Fonte: Santos (2013).

A bacia tem como embasamento rochas cristalinas pré-cambrianas da Faixa Seridó, composta pelo Complexo Caicó, Grupo Seridó e corpos graníticos. As rochas sedimentares presentes na Bacia Potiguar são organizadas em três unidades litoestratigráficas de acordo com Araripe e Feijó (1994): Grupo Areia Branca, Grupo Apodi e Grupo Agulha.

Segundo Pessoa Neto et al. (2007), o preenchimento da bacia está relacionado com as diferentes fases da sua evolução tectônica e corresponde a três supersequência: Rifte (fase Rifte I e II), Pós-Rifte (fase Pós-Rifte) e Drift (fase termal) (Figura 9). A Supersequência Rifte é constituída por depósitos flúvio-deltaicos e lacustres correspondentes as Formações Pendência e Pescada (Berriasiano/Eo-Aptiano), que reúnem arenitos, folhelhos e siltitos. Na

3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

Na área de estudo o arcabouço geológico compreende unidades holocênicas que estão sobrepostas a unidades do Neógeno (Formações Tibau e Barreiras). Geomorfologicamente a área está inserida na unidade Planície Costeira, com feições como Dunas Fixas, Planícies Interdunares, Dunas Móveis, Depressões Interdunares, Falésias, Planície Flúvio-Estuarina, Planície de Maré, Barras Arenosas e Ilhas Barreiras.

Os sedimentos presentes na zona costeira onde está localizada a área de estudo constituem Depósitos Litorâneos Praiais, Depósitos Eólicos Vegetados, Depósitos Eólicos Litorâneos Vegetados e Não Vegetados, Depósitos de Mangue e Depósitos Flúvio-Marinhos (Figura 10).

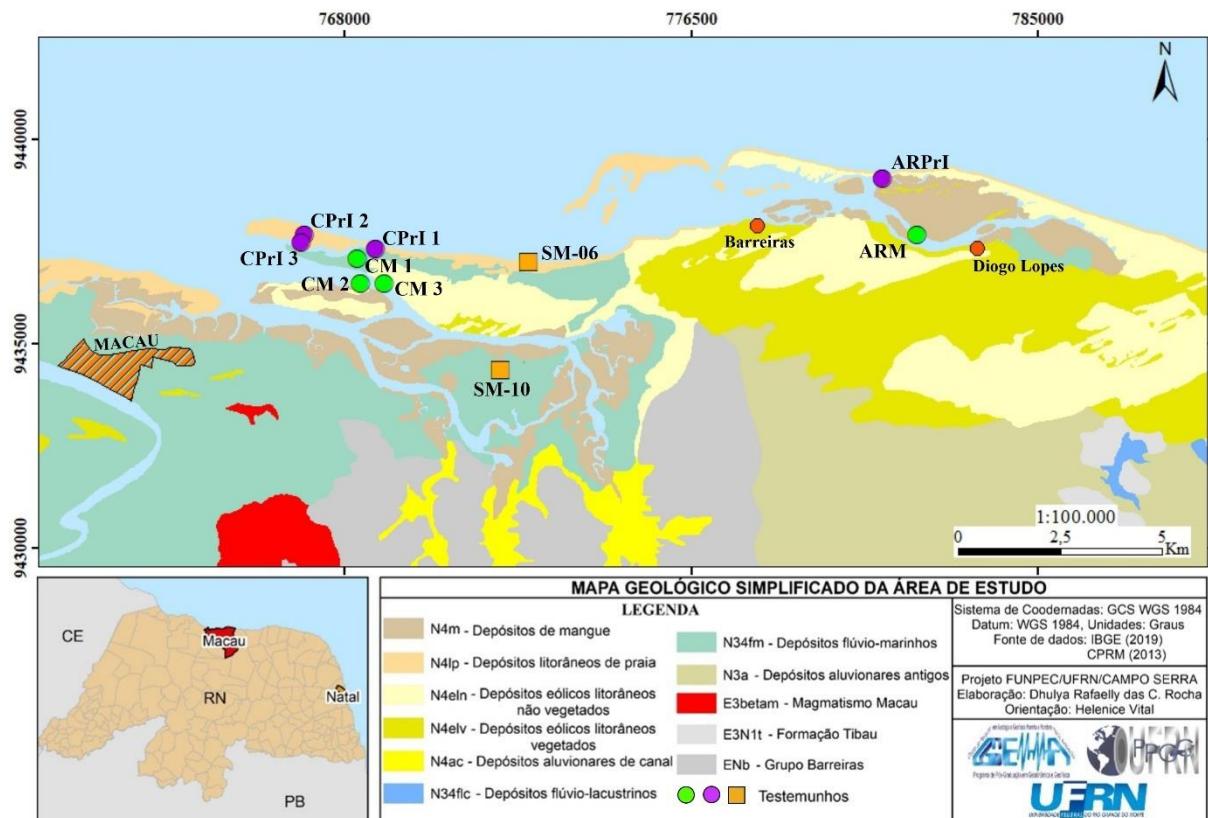


Figura 10: Mapa geológico simplificado da área de estudo.

3.2.1 Depósitos Flúvio-Marinhos

Os depósitos flúvio-marinhos ocorrem associados à planície de maré em áreas protegidas da energia da costa por pontais arenosos e ilhas barreiras. Eles estão sob influência das interações entre as flutuações de marés e o fluxo fluviais. Os sedimentos são constituídos por camadas de areia muito fina, cinza-esverdeada, intercaladas com sedimentos síltico-argilosos escuros, pobremente selecionados e com alto teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica (inclusões de restos vegetais características de áreas com manguezais) (Bezerra et al. 2009). Podem ser encontrados conchas em posição de vida, fragmentos de conchas e clastos de lama (Vital et al. 2013).

3.2.2 Depósitos de Mangue

Os depósitos de mangue estão relacionados a ecossistemas florestais costeiros de influência marinha, localizados na região intermaré, sob forte dependência da energia das marés e da cunha salina (Vital et al. 2013). Também ocorrem em regiões abrigadas da costa, e seus limites com os depósitos flúvio-marinhos são variáveis espacial e temporalmente. Os sedimentos são caracterizados pela elevada quantidade de material lamoso (silte e argila) com quantidade subordinada de areia fina. São fortemente bioturbados pela ação de crustáceos, moluscos e bivalvíos sésseis. As estruturas sedimentares encontradas são laminação plano-paralela (nos sedimentos mais finos) e estratificação cruzada (nos sedimentos mais grossos). A proporção de matéria orgânica (contendo restos de madeira, folhas e turfas) dos depósitos de manguezal é de maneira geral maior que dos depósitos fluvio-marinhos. As idades desses depósitos encontradas para duas amostras datadas pelo método do ^{14}C foram de 5.500 e 1.500 anos (Bezerra et al. 2003; Bezerra et al. 2009).

3.2.3 Depósitos eólicos litorâneos vegetados

Os depósitos eólicos se localizam na faixa litorânea, sendo representados por campos de dunas que podem ser móveis ou estar fixados por vegetação. Nos depósitos eólicos vegetados os sedimentos são compostos por areias quartzosas de granulometria fina a média, bem selecionadas e com grãos subarredondados a arredondados, esféricos a sub-esféricos (Tabosa et al. 2001, Tabosa 2002, Lima 2004, Souto 2004, Costa Neto 2009, Vital et al. 2013). A vegetação que recobre essas dunas é constituída por gramíneas e cactáceas.

3.2.4 Depósitos eólicos litorâneos não vegetados

Os depósitos eólicos litorâneos não vegetados são representados pelas dunas móveis, acumulações eólicas mais recentes, principalmente na forma barcanóide, podendo ainda ter variadas formas. Apresentam granulometria areia fina a média, de composição quartzosa, por vezes com fragmentos de conchas e níveis de minerais pesados. Os grãos são bem selecionados, arredondados a subarredondados e esféricos a subesféricos (Souto 2004; Bezerra et al. 2009). Os depósitos interdunas são constituídos por sedimentos grossos e fragmentos de conchas que não foram capazes de migrar junto com a duna.

3.2.5 Depósitos Litorâneos Praiais

Os depósitos litorâneos praias são representados por sedimentos de praia, principalmente da zona de estirâncio, deltas de maré vazante e sistemas de ilhas barreiras-pontais arenosos (Vital et al. 2013). Eles ocorrem paralelos e por vezes perpendiculares à linha de costa, sendo compostos por areias quartzosas com granulometria variando de muito fina a muito grossa, de coloração cinza claro a esbranquiçado, com grandes quantidades de bioclastos (>5%) e, por

vezes, de minerais pesados. O constante retrabalhamento desses sedimentos por processos costeiros marinhos e eólicos gera variações morfológicas na praia, como a geração de terraços marinhos, cúspides praias, bermas e dunas frontais (Souto 2004; Bezerra et al. 2009). As idades obtidas para esses depósitos variam de cerca de 5.500 anos AP a cerca de 300 anos AP (Bezerra et al. 2009).

3.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

As ilhas barreiras e pontais arenosos que se encontram em águas costeiras de plataforma continental rasa estão submetidos à interação de forças hidrodinâmicas e eólicas que gera um ambiente de alta energia. A distribuição dos sedimentos, ao longo da linha de costa, é influenciada por condicionantes meteoceanográficos como ondas, correntes, marés, ventos, influxo fluvial, e processos atmosféricos. Segundo Costa (2010) para a região de estudo a importância dos elementos climáticos, aliada a outros fatores é determinante para a intensa dinâmica costeira local.

3.3.1 Clima

A área de estudo apresenta um clima tropical equatorial quente, semiárido, considerando a classificação de Nimer (1989). É uma região quente e seca com chuvas escassas, anualmente sofrendo estiagens. De acordo com dados do período de 1961 a 2017 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), provenientes da estação convencional de Macau/RN (desativada em 2018), a temperatura média anual é superior a 27°C para o período amostrado (Figura 11), com média de 29°, máxima de 34°C e mínima de 22°C no ano de 2017.

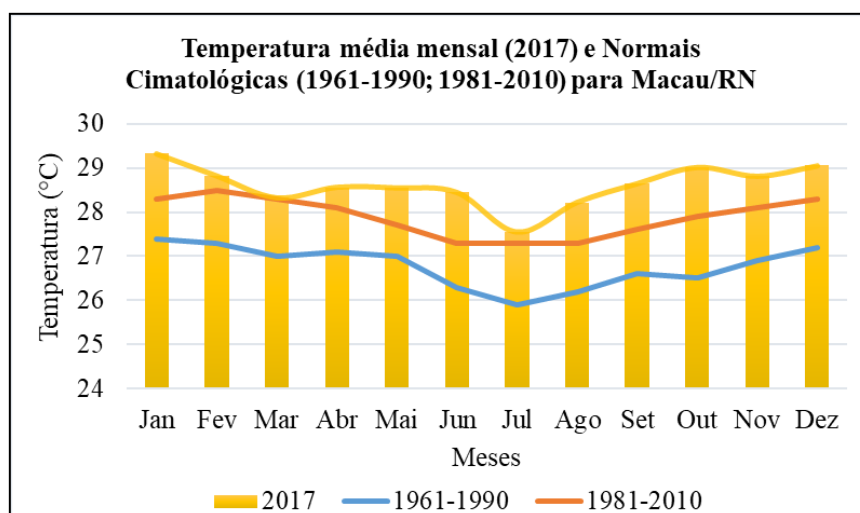


Figura 11: Temperatura média mensal (2017) e Normais Médias Mensais de Temperatura (°C) (1961-1990; 1981-2010). Fonte: INMET.

A insolação é considerada uma das mais fortes do Brasil no mês de novembro (Costa, 2010). Nas medidas da Estação Meteorológica de Macau entre 1981 e 2010, o total anual médio

de horas de insolação é de 2.583,4 horas, o valor médio mensal é de 215,3 horas, com valor máximo no mês de novembro (273,6 horas) e mínimo no mês de junho (175,7 horas).

A região é caracterizada por duas estações: uma seca com período mais longo 7 a 8 meses (junho a janeiro) e uma estação úmida (inverno) com período pluvial curto nos meses de fevereiro a maio (IDEMA 1999). Considerando as médias mensais de precipitação no Município de Macau/RN entre os anos de 1961 a 2017, é possível observar que as maiores precipitações ocorrem entre os meses de fevereiro e maio (período chuvoso), com as maiores médias nos meses de março e abril, e as menores precipitações estão entre os meses de agosto e dezembro (período de seca) (Figura 12), com precipitação média anual em torno de 500 mm.

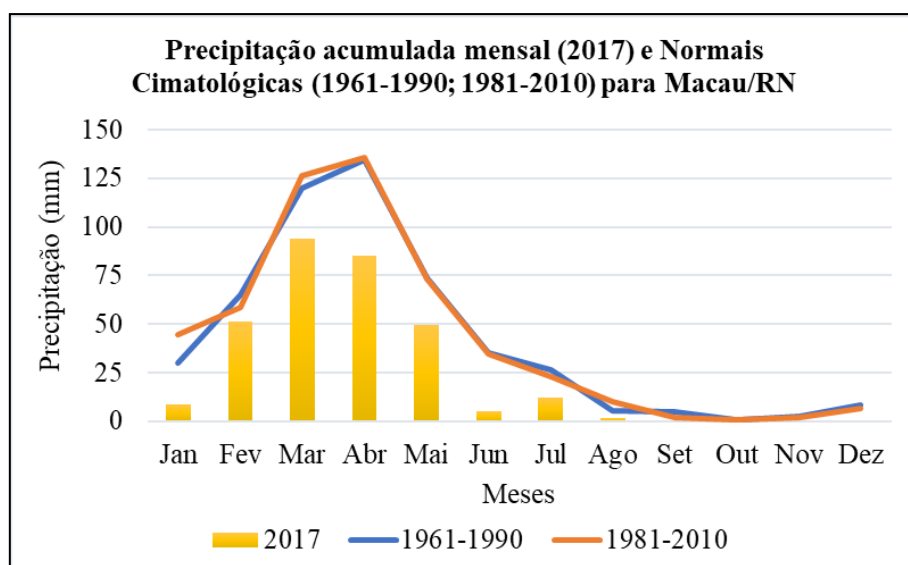


Figura 12: Precipitação acumulada mensal (2017) e Normais Médias Mensais de Precipitação (mm) (1961-1990; 1981-2010). Fonte: INMET.

Segundo dados do INMET da Normal Climatológica de 1981 – 2010, a média da umidade relativa do ar anual é 72%, podendo ocorrer uma variação anual de 12%. Os maiores índices de umidade relativa do ar (janeiro a junho) são os meses que apresentaram os maiores índices pluviométricos.

3.3.2 Ventos

No litoral do nordeste brasileiro os ventos sopram de leste/nordeste (E/NE) e leste/sudeste (E/SE). Segundo dados da Normal Climatológica de 1961-1990 da estação convencional de Macau/RN (Figura 13), os meses com maiores médias são entre agosto e dezembro, durante o período seco, enquanto as menores velocidades são registradas entre fevereiro e julho, no período chuvoso. A maior velocidade média mensal é de 6,92 m/s em setembro, e a menor é de 4,29 m/s em abril.

Com relação à direção, durante a maior parte do ano se tem a predominância dos ventos alísios de E/SE (Figura 13), entretanto, nos meses de outubro a fevereiro sopram principalmente

os ventos alísios de E/NE, com velocidade que pode chegar a 6,84 m/s. Apesar da atuação restrita ao longo do ano, os ventos E/NE são mais competentes no transporte sedimentar, de modo que seus efeitos prevalecem sobre campos de dunas os quais migram da praia para o continente seguindo a direção nordeste-sudoeste (NE-SW) (Costa Neto 2009, Silva et al. 2015, Silva 2019).

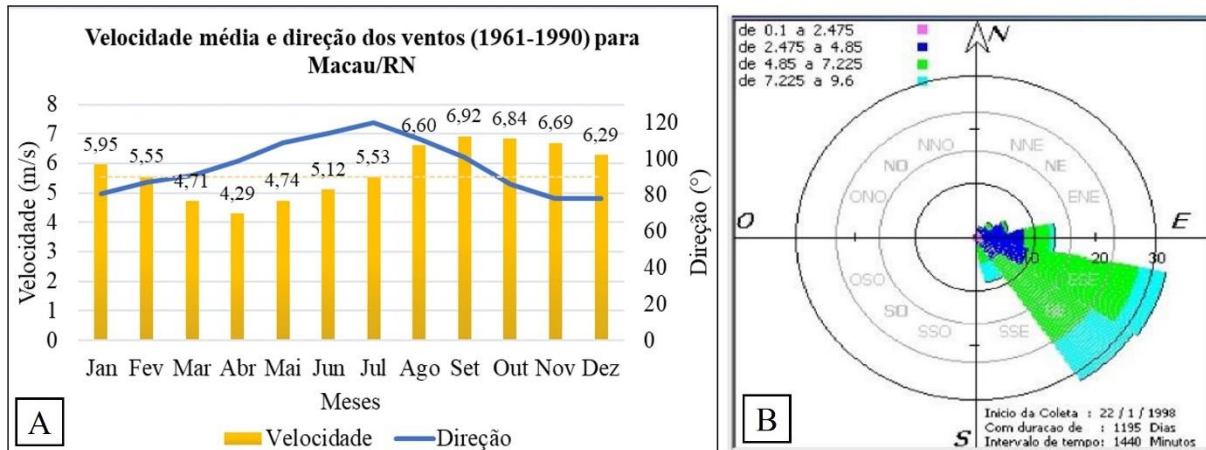


Figura 13: A - Velocidade média e direção do Vento (m/s); B - Direção dos ventos predominantes na área de estudo segundo a Normal Climatológica de 1961-1990 da Estação Climatológica Convencional de Macau/RN. Fonte: INMET.

3.3.3 Hidrografia

De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA), a rede hidrográfica no município de Macau está inserida na bacia hidrográfica Piranhas-Açu, considerada a maior da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, com área total de 43.683 km². Em seu curso foram construídos dois reservatórios que perenizam o rio: Curema/Mãe d'Água, na Paraíba, e Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte.

A feição hidrográfica que se destaca na área é o estuário do rio Açu, sendo constituída por canais de maré e pelos rios Casqueira e Conceição, localizados a leste da cidade de Macau. Os rios da região de estudo são de caráter intermitente, cuja contribuição proveniente do continente ocorre por drenagens ativas nos períodos chuvosos, com baixas vazões, tendo um insignificante aporte fluvial. Dessa forma, ocorre a penetração das marés no interior da planície costeira, o que provoca a formação de canais de marés (Vital et al., 2013), que possuem um papel importante na dinâmica local.

3.3.4 Vegetação

De acordo com o Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA) do IBGE no município de Macau a vegetação presente em 37,7% do território é a Savana estépica arborizada, 23,4% correspondem a Formação Pioneira com influência fluviomarinha, 11,4% são de Formação Pioneira com influência marinha. No município 23,9% da cobertura vegetal

foi substituída por áreas para agropecuária, 2,6% da área se refere a corpos d'água, 0,8% são dunas e 0,2% é a cobertura urbana.

A vegetação da região é marcada por dois tipos principais, a vegetação de caatinga e a vegetação litorânea (manguezais e restingas). A Savana-Estépica Arborizada (vegetação de caatinga) é caracterizada por nanofanerófitos de até 5 metros de altura, com uma distribuição espaçada ou aberta, comumente apresentando divisão em galhos e muita ramificação, contendo espinhos ou acúleos. A Formação Pioneira com influência fluviomarinha corresponde a uma vegetação de caráter edáfico que constitui os manguezais e campos salinos, situados em terrenos sedimentares holocênicos nas desembocaduras dos rios, onde ocorre o encontro das águas doces com as águas salgadas. Nesses locais cresce uma vegetação adaptada à salinidade das águas. A Formação Pioneira com influência marinha é caracterizada pela vegetação conhecida como restinga, que recebem influência direta das águas do mar. Essa vegetação ocupa as faixas de praias, as formações dunares e dos cordões arenosos litorâneos.

3.4 PROCESSOS COSTEIROS

3.4.1 Ondas

Na área de estudo as ondas chegam à costa na mesma direção dos ventos predominantes (vindos de E/NE) (Alves 2001), tendo as alturas máximas atingidas durante o inverno e outono (Paiva 2019). De acordo com Chaves & Vital (2001) que conduziram estudos no trecho de praia entre a ponta do Tubarão e o canal de maré Corta Cachorro (Macau/RN), no período de novembro de 2000 a junho de 2001, a variação na altura das ondas na região foi de 0,13 a 0,72 metros e o período de 3,26 a 8,00 segundos.

3.4.2 Correntes

As correntes litorâneas no setor setentrional do estado fluem paralelamente à costa, principalmente para oeste, podendo mudar de direção de acordo com as marés (Vital 2009). A ação dos ventos alísios de sudeste sobre as ondas faz com que estas atinjam a costa em um ângulo característico capaz de originar as correntes de deriva litorânea, que possuem uma maior capacidade de transporte de sedimentos ao longo da costa (Rocha 2010). Essas correntes são responsáveis por transportar sedimentos de leste para oeste, desenvolvendo as formas encontradas paralelas à linha de costa. Chaves & Vital (2001), em estudo hidrodinâmico na região entre a ponta do tubarão e o canal de maré Corta Cachorro apresentam valores de velocidade da corrente de deriva litorânea entre 0,17 m/s e 1,10 m/s, cuja variação média do ângulo de incidência das ondas foi 305° Az.

De acordo com Vital (2009), subordinadamente ocorrem as correntes de maré. Estudos realizados por Costa Neto (2009) no sistema Pisa-Sal (Galinhos/RN) apresentaram velocidades médias de vazante e enchente nas marés de sizígia e quadratura durante o inverno e verão. Os resultados mostraram que a velocidade média de vazante em todas as fases é maior que as velocidades de enchente, com valores entre 0,19 e 0,38 m/s para as correntes de vazante e entre 0,16 e 0,30 m/s para correntes de enchente.

3.4.3 Marés

O estado do Rio Grande do Norte é caracterizado por um regime de mesomaré semi-diurna, com duas preamares e duas baixa mares no período de 24h. No litoral norte as marés possuem altura máxima de 3,3 metros durante as marés de sizígia e 2,5 metros nas marés de quadratura (Araújo et al. 2004; Vital 2009).

A partir de dados de maré da região de Macau no mês de abril de 2018 foi possível confeccionar uma curva de maré (Figura 14). Na curva pode-se observar que a altura máxima da maré foi de 2,7 m nas marés de sizígia e 2,2m nas marés de quadratura. A amplitude de maré (variação entre o máximo da maré enchente e o máximo da maré vazante) foi de 2,7 m na maré de sizígia e 1,6 m na maré de quadratura. Nessa região a maré apresenta condições bastante energéticas, mobilizando continuamente sedimentos ao longo da costa. De acordo com Vital et al. (2008), a forte influência da maré se reflete na presença de deltas de maré vazante ao longo do sistema ilhas barreiras-pontais arenosos e na foz dos rios, assim como pontais arenosos perpendiculares à costa.

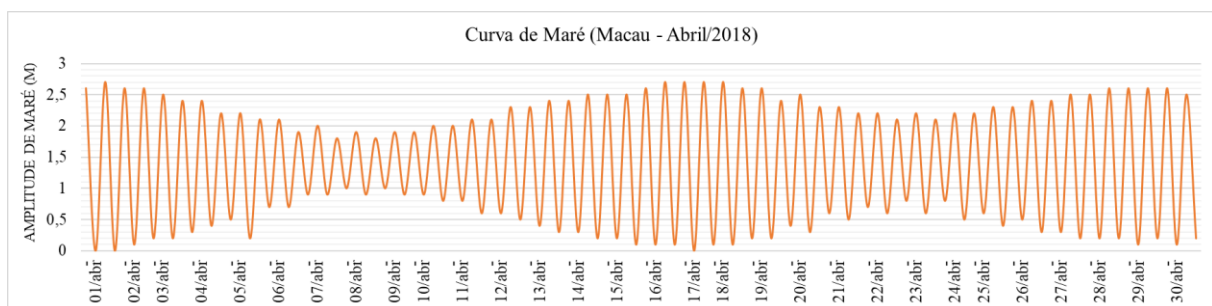


Figura 14: Curva de maré para de abril de 2018 da região de Macau/RN a partir de dados da Tábua de Maré.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram utilizados dados já disponíveis no acervo do Laboratório de Pesquisa em Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA) e dados coletados exclusivamente para um melhor desenvolvimento desta pesquisa.

Como etapa inicial foi realizado um levantamento/revisão bibliográfica, construindo uma base de dados a partir de conhecimentos pré-existentes acerca das ilhas barreiras e pontais arenosos. A metodologia adotada para a obtenção das informações da base de dados utilizada

foi composta por 2 etapas principais: aquisição de dados em campo e atividades em laboratório. Essas etapas ocorreram em diferentes datas e foram realizadas por equipes do Grupo de Pesquisa em Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental. Os produtos dessas etapas são parte integrante da base de dados utilizada nessa pesquisa. O Fluxograma das atividades desenvolvidas é apresentado na Figura 15.



Figura 15: Fluxograma adotado no presente trabalho.

4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A pesquisa teve início com a etapa de levantamento bibliográfico de artigos, relatórios, boletins, dissertações, teses e livros de trabalhos com o intuito de construir e desenvolver uma fundamentação teórica a partir da bibliografia pré-existente acerca das ilhas barreiras e pontais arenosos em geral e sua ocorrência no litoral setentrional do estado, bem como dos conceitos de sedimentologia e estratigrafia que seriam aplicados ao trabalho. Posteriormente teve-se acesso a base de dados geológicos e geofísicos pré-existentes.

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO

Os testemunhos, as amostras de superfície e fundo de canal, bem como as linhas batimétricas utilizadas neste estudo encontram-se dispostos espacialmente conforme mostra a Figura 16.

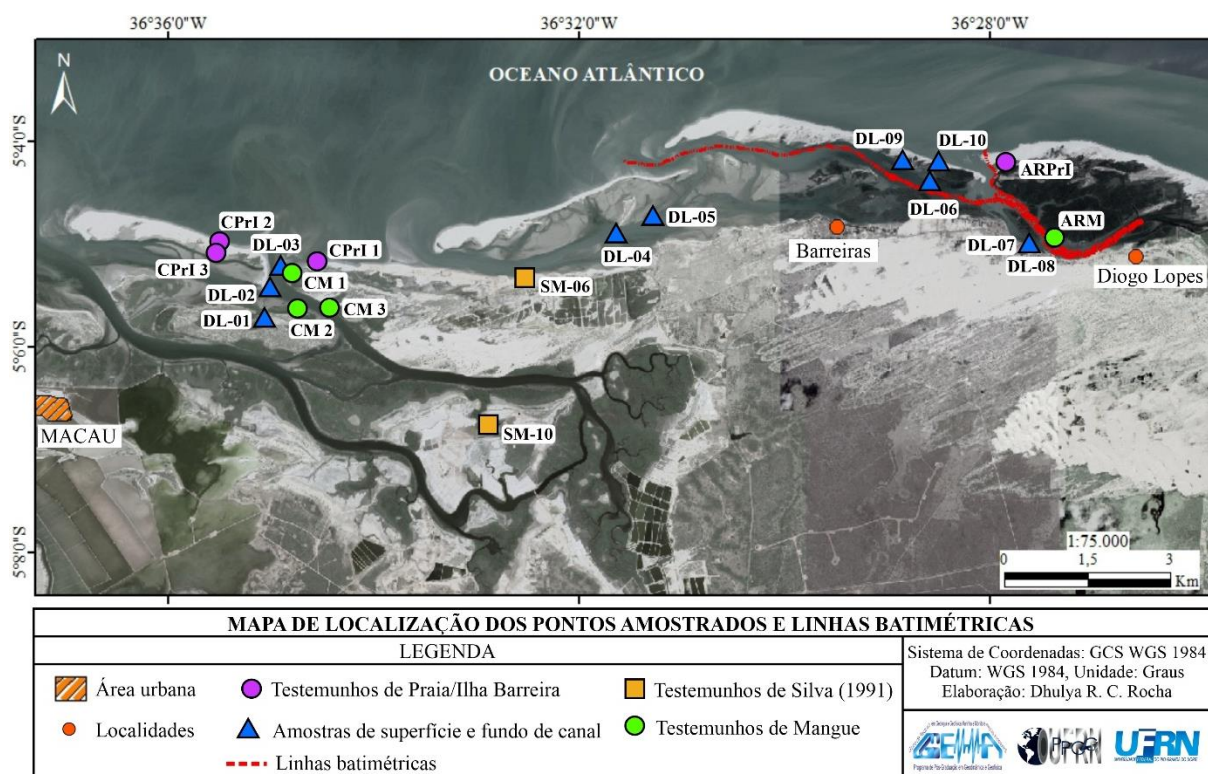


Figura 16: Mapa de localização dos pontos amostrados e das linhas batimétricas.

4.2.1 Coleta de dados batimétricos

Métodos geofísicos acústicos são comumente aplicados para caracterização do fundo e subfundo marinho. Esses métodos se baseiam na geração, transmissão, reflexão/refração e recepção de pulsos sonoros através dos meios físicos e suas interfaces. Fontes artificiais são colocadas na superfície da água e geram pulsos acústicos, transmitidos ao meio aquoso em forma de onda, que ao atingir o fundo marinho e as camadas em subsuperfície podem sofrer refração, reflexão ou retroespalhamento. A depender das características do meio atingido, da resistência do meio à passagem da onda, da rugosidade do fundo e da frequência em que a onda foi emitida são obtidas respostas diferentes. A partir das informações adquiridas é possível caracterizar uma região sem ter acesso direto a ela, obtendo diversas informações como profundidade, relevo, textura, espessura e tipo de material no qual a onda acústica está se propagando.

O método batimétrico é utilizado para medir a profundidade, mapear a morfologia e gradiente do fundo de corpos d'água. Esse método se baseia na emissão e recepção de ondas a partir de transdutores, que são equipamentos que transformam energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. A medida da profundidade é determinada a partir do tempo em que a onda emitida percorre a coluna d'água e retorna para o transdutor, multiplicando-se o tempo medido pela velocidade do som na água do mar e dividindo por 2.

Os dados de batimetria utilizados no trabalho foram adquiridos em novembro e dezembro de 2017, pela equipe do GGEMMA. As linhas estão distribuídas ao longo do canal próximo ao distrito de Diogo Lopes (Figura 16).

De acordo com Silva (2017), os dados batimétricos foram coletados com o Sonar interferométrico EDGETECH 4600 (Figura 17), que foi anexado na lateral bombordo da embarcação “Spirit of Noronha”, por meio de um tubo de aço fixo ao suporte de ferro o qual foi preso à borda da embarcação. As antenas GPS e GYRO foram acopladas ao tubo de aço e o sensor de movimento, montado o mais próximo do centro de massa da embarcação, região abaixo da escada de acesso à cabine de comando.

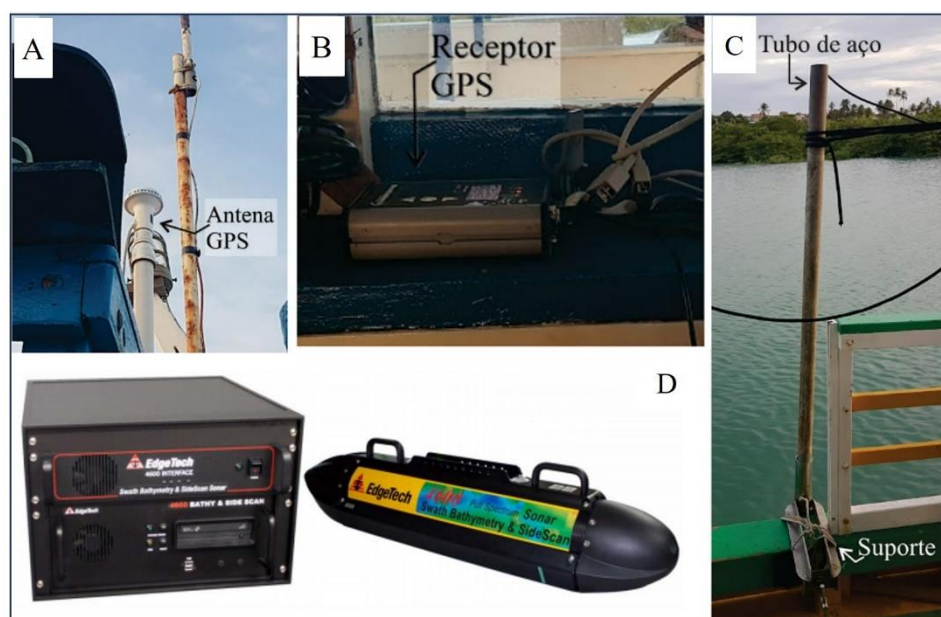


Figura 17: A – Antena GPS acoplada em tubo de aço na embarcação; B – Receptor GPS; C – Tubo de aço utilizado para acoplar o sonar; D - Sonar interferométrico 4600 EdgeTech. Fonte: Silva (2017).

Os *offstes* foram medidos, com o auxílio de uma trena, utilizando o padrão do Software HYPACK, este padrão considera as medidas obtidas para frente (X), estibordo (Y) e para baixo (Z) como positivas e em relação ao sensor de movimento - TSS.

4.2.2 Coleta de testemunhos

Os testemunhos que compõem a base de dados desse trabalho, em sua maior parte, foram disponibilizados pelo Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA) do Departamento de Geologia da UFRN; adicionalmente foram também utilizados testemunhos anteriormente analisados por Silva (1991) e disponibilizados pela PETROBRAS.

Os testemunhos foram coletados utilizando o método de testemunhagem por vibração (*vibracore*), método de amostragem que permite a recuperação de testemunhos contínuos e não perturbados (indeformados) de materiais não consolidados, pouco compactados ou semi-

litificados, podendo recuperar amostras de diferentes comprimentos dependendo das propriedades do sedimento. O princípio desta técnica são vibrações de alta frequência e baixa amplitude que são geradas por um motor e transferidas para o tubo através de um eixo de aço. A vibração então percorre do topo até a base do tubo de testemunho anexado. Essa energia vibracional liquefaz o sedimento, permitindo que o tubo penetre nos sedimentos liquefeitos.

Os testemunhos disponibilizados pela PETROBRAS (SM-06 e SM-10), representados pela cor laranja na Figura 16, utilizaram uma unidade vibracore portátil padrão projetada por Lanesky et al. (1979), que usava um motor a gasolina de 4,0 Hp com adaptador para um vibrador de concreto. O vibrador é fixado por um par de grampos a um tubo de irrigação de alumínio de 3,5" de diâmetro e 6 m de comprimento. Após a perfuração a recuperação do testemunho foi feita através de uma polia de corrente montada em um tripé com capacidade para 1 tonelada.

Os testemunhos disponibilizados pelo GGEMMA foram coletados nas áreas de ilha barreira e manguezal, em marés de sizígia, entre os meses de março e abril de 2018 durante a maré baixa (as amplitudes de maré para o mês de abril foram apresentadas na caracterização da área de estudo, Figura 14).

Seis pontos foram amostrados próximos à bases e estradas de acesso do Campo Serra, dos quais três pontos são em região de praias/ilhas barreiras (Campo de Praia/Ilha Barreira - CPRI 1, 2, 3), representados na Figura 16 pela cor roxa, e três pontos são em área de mangue (Campo de Mangue - CM 1, 2, 3), cor verde na Figura 16. Dois pontos encontram-se mais afastados dos demais, em áreas de praias/ilhas barreiras (Área de Referência de Praia/Ilha Barreira - ARPrI) e mangue (Área de Referência de Mangue - ARM) sem interferência antrópica. Em cada área foram adquiridos 3 testemunhos (nomeados de A, B e C), totalizando 24 testemunhos. Foram usados tubos de alumínio com 50 mm de diâmetro, 1,58 mm de espessura e 6000 mm de comprimento. Os tubos foram retirados com o auxílio de um tripé e uma talha (Vital et al. 2018a) (Figura 18). Em seguida foram serrados a cada metro, lacrados nas extremidades com tampas demarcando o topo e a base dos testemunhos, e armazenados para análises em laboratório.



Figura 18: A - Tubo de alumínio utilizado na sondagem por vibração; B - Vista do tripé e testemunho coletado na área CPR11; C - Retirada do testemunho com uso da talha; D - Sondagem na área de referência em Frente a Diogo Lopes (RM), com posicionamento dos 3 testemunhos. Fonte: Vital et al. (2018a).

4.2.3 Coleta de amostras de superfície e fundo de canal

As amostras superficiais e de fundo de canal foram coletadas no mês de maio de 2023. Foram definidos pontos de interesse que abrangessem diferentes depósitos encontrados no sistema ilhas barreiras/pontais arenosos (Figura 16). O acesso aos pontos se deu pelos canais de maré que fazem parte do sistema e utilizou-se uma canoa com motor para realizar os deslocamentos (Figura 19 A). As coordenadas geográficas da localização dos pontos de coleta foram obtidas com o GPSMAP 76CSx da Garmin.

A amostragem do sedimento em superfície se deu com a utilização de uma concha pegador de material. Após a retirada dos sedimentos estes foram acondicionados em sacos plásticos e identificados (Figura 19 B) para posterior análise em laboratório. A amostragem nos canais foi executada através de um amostrador de sedimentos do tipo van Veen, apropriado para coleta amostras de sedimentos aquáticos de fundo em rios, estuários ou oceanos. O equipamento utilizado foi de pequeno porte, empregado para regiões mais rasas, sendo operado manualmente (Figura 19 C e D). O sedimento recuperado foi despejado em uma bandeja, armazenado em sacos plásticos e identificado (Figura 19 D) para análises seguintes.

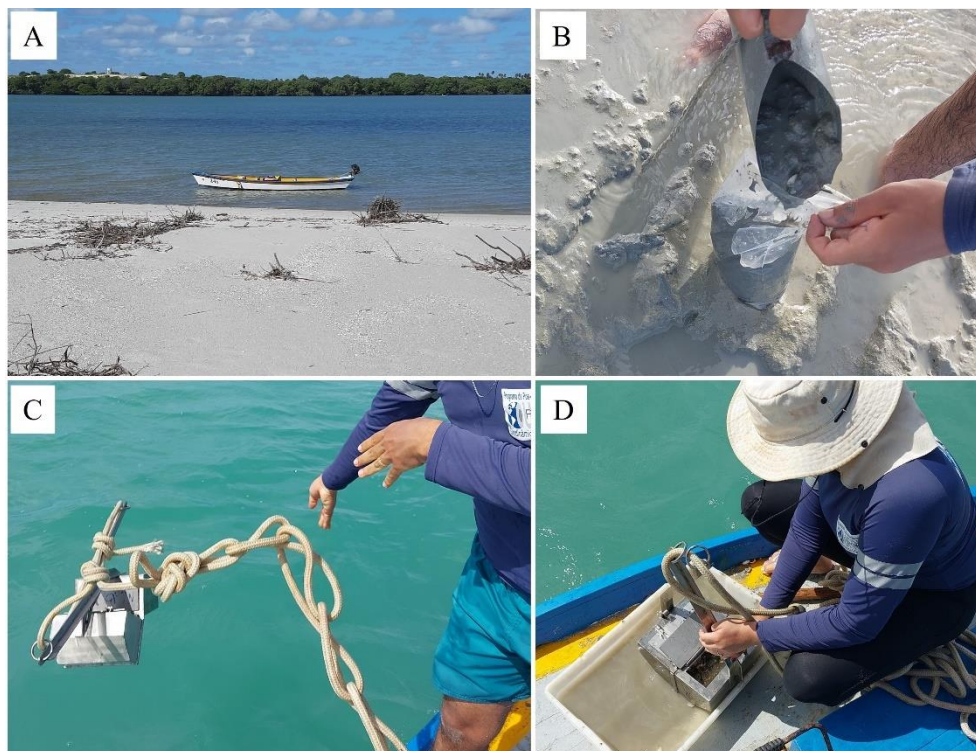


Figura 19: A - Embarcação utilizada para o deslocamento nos canais de maré; B - Coletor de material e amostra acondicionada em saco plástico; C - Lançamento do amostrador van Veen na água; D - Recuperação do sedimento coletado pelo van Veen.

4.3 ATIVIDADES EM LABORATÓRIO

4.3.1 Processamento dos dados batimétricos

O processamento dos dados tem como objetivo filtrar os erros sistemáticos e medidas incorretas que podem vir acompanhando o dado adquirido durante o levantamento, devido os movimentos da embarcação e por calibrações indevidas dos equipamentos. Os dados de batimetria foram processados no software CARIS HIPS and SIPS 11.4, no Laboratório GGEMMA e seguiram o fluxo mostrado na Figura 20.

Inicialmente foi realizada a importação dos dados (linhas, configurações da embarcação, sensores), posteriormente, devido erros na calibração do GPS foi necessário fazer a correção dos dados de navegação, excluindo-se manualmente dados espúrios. Após as correções necessárias foi feito o georreferenciamento das linhas batimétricas, amarrando as linhas às coordenadas do local dentro de um sistema de coordenadas global. Seguindo o processamento, foi criada então a superfície batimétrica e realizada a limpeza, retirando-se de maneira manual os dados inconsistentes, para que não interfiram no resultado e apresente feições que não existem na realidade. Finalizada a etapa de limpeza, a superfície batimétrica final pôde ser exportada em diferentes formatos (JPEG, GEOTIFF, XYZ, entre outras) com informações que serão utilizadas na descrição e interpretação da batimetria da área de estudo.

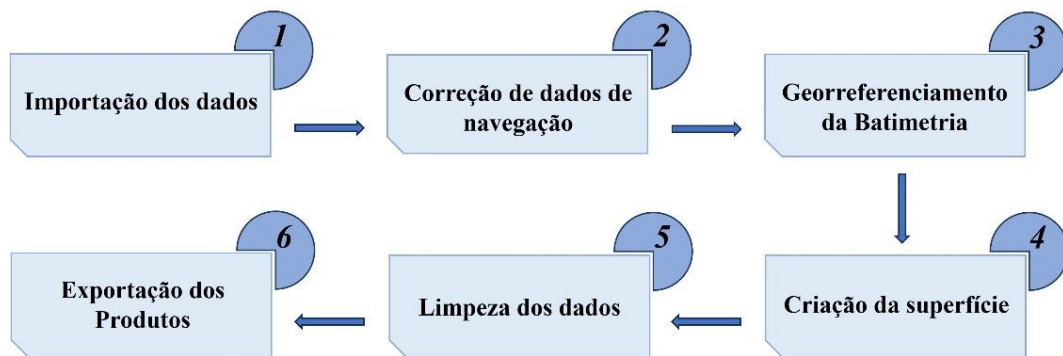


Figura 20: Fluxograma do processamento de dados batimétricos.

4.3.2 Processamento dos testemunhos

Os testemunhos foram fotografados e analisados com coregama no Laboratório de Sedimentologia da PETROBRAS, Unidade de Operação do Rio Grande do Norte e Ceará (UO-RNCE); as descrições visuais e demais análises foram realizadas em laboratórios da UFRN.

Para se obter os perfis de raios gama foi utilizado um perfilador espectral de raios gama, modelo Spectral Core Gamma System. Os testemunhos seccionados foram inseridos a uma velocidade uniforme, onde um cintilômetro contendo um cristal (comumente de fósforo, com iodeto de sódio e tálio ativado) emite finas centelhas de luz quando atingido por um fóton. Acoplado ao cristal tem-se um tubo fotomultiplicador, que amplifica a corrente elétrica em um milhão de vezes, a luz é então convertida em pulsos elétricos que são transformados em uma unidade física mensurável expressa em Unidade API-UAPI (uma UAPI é igual a 1/200 da leitura feita entre os valores máximos e mínimos do poço padrão nos Estados Unidos) (Nery 2013; Cruz 2022). O referido equipamento possui multicanais analisadores, que discrimina cada um dos componentes do espectro energético (U, Th e K). As concentrações individuais dos elementos são dadas em partes por milhão (ppm) para U e Th e percentagem (%) para K. Os valores obtidos foram inseridos em uma planilha no software Excel para representação gráfica dos perfis.

As descrições visuais foram realizadas no Laboratório GGEMMA. Em uma bancada, com o auxílio de uma régua de 100 cm, foram marcados os intervalos em que o sedimento apresentava características semelhantes e medidas as respectivas profundidades. As descrições foram feitas do topo para a base dos testemunhos e as características observadas foram: cor, granulometria, e presença de matéria orgânica, conchas e estruturas sedimentares (estratificações, marcas de raiz). A cartela de cores “*Rock Color Chart*” de Munsell (2009) foi usada como padrão na determinação da cor de cada intervalo descrito. Os sedimentos foram classificados por comparação com tabelas padrão em areia grossa, média, fina ou lama (silte/argila).

Após a descrição macroscópica foram definidos intervalos de amostragem para a realização de análises da granulometria, teor de carbonato e teor de matéria orgânica. Cada testemunho foi amostrado em segmentos equidistantes, com quatro intervalos principais: 5 a 10 cm, 33 a 38 cm, 62 a 67 cm e 90 a 95 cm (Figura 21 A). Alguns testemunhos tiveram intervalos adicionais amostrados, quando visualmente apresentavam características diferentes ou quando os testemunhos possuíam profundidades maiores que 100 cm. Os sedimentos amostrados foram então acondicionados em sacos plásticos e identificados com o nome do testemunho e profundidade da amostra.

As amostras foram tratadas no Laboratório de Sedimentologia do Setor de Estudos Ambientais no Museu Câmara Cascudo da UFRN onde foram lavadas para retirada do sal e secas. Os sedimentos foram colocados em béqueres de 1000 ml e adicionado água até a medida de 600 ml (Figura 21 B). A cada 12h a água era substituída, até totalizar 3 lavagens.

Finalizada a lavagem o excesso de água foi retirado e o sedimento foi levado para secar em uma estufa à 60°C (temperatura que não desidrata argilominerais) (Figura 21 C). As amostras secas foram então quarteadas e separados 10g do material, sendo 5g destinado para determinação do teor de carbonato e 5g para matéria orgânica (Figura 21 D, E). O restante foi pesado para análise granulométrica.

4.3.2.1 Análise granulométrica

As análises granulométricas foram realizadas no laboratório de Geografia Física – LabGeoFis, Departamento de Geografia da UFRN, através do método de peneiramento a seco, com base na metodologia descrita por Folk (1968). No peneiramento foi utilizado um conjunto de peneiras com aberturas de malha de 2 mm, 1 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm, 0,063mm e um aparador (Figura 22 A). O sedimento foi pesado e colocado no conjunto de peneiras que foi levado ao agitador durante 15 minutos, após isso o sedimento retido em cada peneira foi pesado e anotado o valor.

Os dados obtidos no peneiramento foram inseridos no software Sistema de Análise Granulométrica - SAG (Dias & Ferraz 2004) para cálculos de parâmetros estatísticos como média, mediana, assimetria, selecionamento e curtose e para a classificação do sedimento.

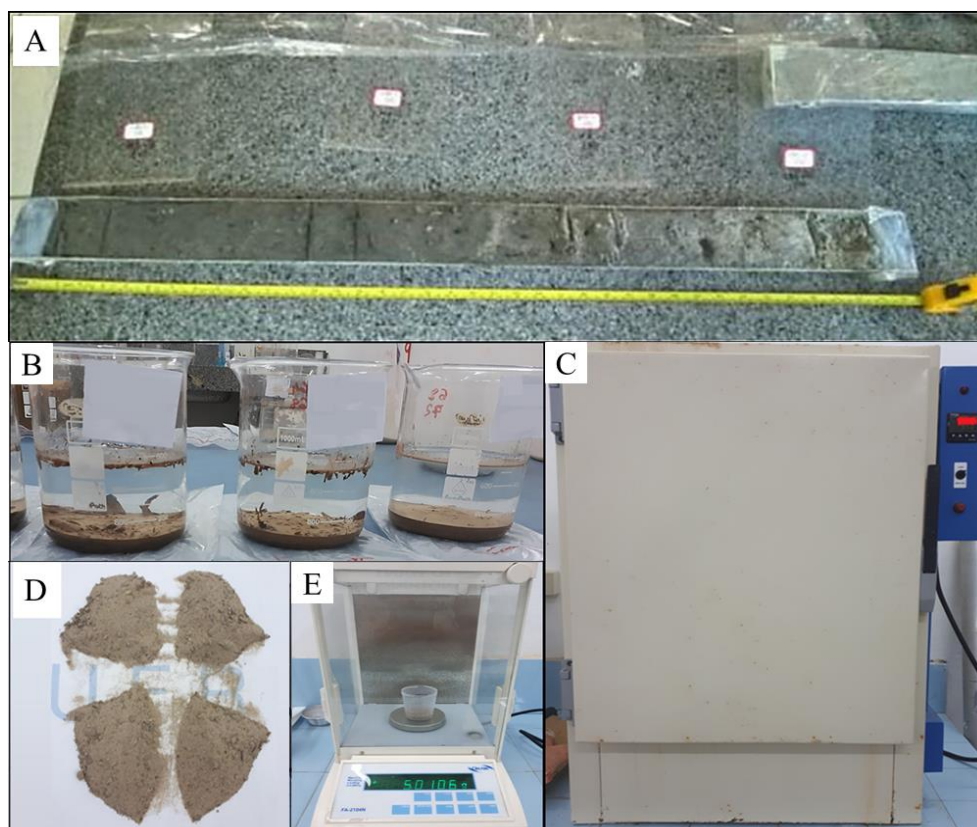


Figura 21: A - Testemunhos marcados a intervalos regulares para amostragem. Fonte: Vital et al. (2018b); B - Lavagem dos sedimentos nos béqueres; C - Estufa utilizada para secagem dos sedimentos; D - Amostra quarteada; E - Separação do material destinado para determinação do teor de carbonato.

4.3.2.2 Teor de Carbonato de Cálcio

A quantificação do teor de carbonato foi feita no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da UFRN. Foram utilizados 5 gramas da amostra de sedimento para a quantificação do teor de carbonato, o sedimento foi colocado em um béquer e adicionados 20 ml de ácido clorídrico (HCl) a 10% (Figura 22 B). A partir da reação do ácido clorídrico com o carbonato (CaCO_3) presente na amostra, foi possível quantificar a massa de CaCO_3 que existia antes de ser dissolvido pelo ácido.

Após o fim da reação as amostras foram lavadas para retirar o ácido. Filtros de papel dobrados e previamente pesados foram colocados em funis apoiados por suportes e foi colocado um recipiente de vidro de 1L abaixo de cada funil (Figura 22 C). O material (sedimento + ácido) foi então despejado no filtro e adicionou-se água aos poucos lavando o sedimento até encher o recipiente de vidro. Os filtros então foram colocados em recipientes e levados à uma placa aquecedora na temperatura de 60°C para secar e posteriormente serem pesados. A massa final do sedimento foi calculada subtraindo a massa inicial do filtro da massa final. A equação utilizada para calcular o teor do carbonato é descrita abaixo:

$$\text{Teor de carbonato} = \frac{\text{Massa inicial do sedimento} - \text{Massa final do sedimento}}{\text{Massa inicial do sedimento}} \times 100$$

Onde: Massa inicial do sedimento = massa da amostra antes do ataque ácido; Massa final do sedimento = massa do filtro com o sedimento - massa inicial do filtro.

4.3.2.3 Teor de Matéria Orgânica

A quantificação do teor de matéria orgânica também foi realizada no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da UFRN. Em cadinhos previamente pesados, foram colocados 5 gramas de sedimento, separados anteriormente. Para realizar a queima da matéria orgânica presente no sedimento, os cadinhos foram colocados em uma mufla a uma temperatura de 600°C, durante um intervalo de tempo de 5 horas (Figura 22 D). Decorrido esse tempo foi aguardado o resfriamento dos cadinhos. Que foram novamente pesados para quantificação da massa após a eliminação da matéria orgânica. Com os valores da massa do sedimento antes e depois do processo de queima, é conhecida a massa de material que foi consumida e assim calculado o teor de matéria orgânica utilizando a seguinte equação:

$$\text{Teor de matéria orgânica} = \frac{\text{Massa inicial} - \text{Massa final}}{\text{Massa inicial}} \times 100$$

Onde: Massa inicial = massa inicial da amostra no cadinho – massa do cadinho; Massa final = massa final da amostra no cadinho – massa do cadinho.

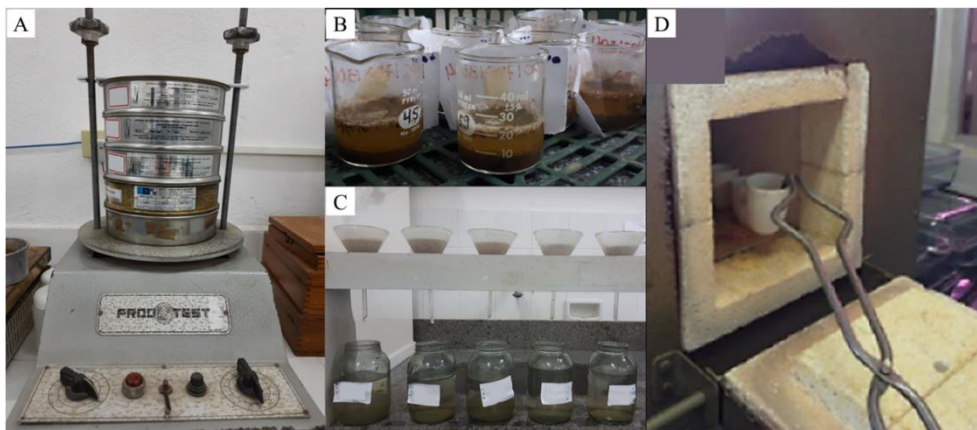


Figura 22: A - Conjunto de peneiras posicionado no agitador; B - Béqueres com 5g da amostra de sedimento mais 20 ml de ácido clorídrico (HCl) a 10%; C - Filtros e funis utilizados na lavagem das amostras para retirada do HCl. Fonte: Rocha (2021); D - Cadinhos na mufla. Fonte: Vital et al. (2018b).

4.3.2.4 Análise morfooscópica e mineralógica

Essa etapa foi realizada no GGEMMA, nela fez-se a observação de parâmetros texturais e mineralógicos utilizando a lupa binocular, com luz refletida de 45° e luz transmitida, marca Zeiss, modelo Stemi SV-11, com aumento máximo de 40 vezes. Para a captura das imagens microscópicas, foi utilizada uma câmera digital acoplada à lupa.

Uma quantidade representativa de cada intervalo amostrado foi levada à lupa, e feita a descrição de arredondamento, esfericidade e composição mineralógica dos grãos desse material. As análises texturais foram realizadas fazendo-se comparações com escalas padrão,

como a de Powers (1953) e adaptações de Dias (2004). As análises mineralógicas quantitativas foram estimadas através de comparação visual com tabelas padrões de porcentagem dos constituintes minerais como de Terry e Chilingar (1955) (Vital et al. 2018b). A identificação dos minerais foi conduzida com base em suas propriedades físicas observadas ao microscópio com auxílio do atlas “Minerais em grãos – técnicas de coleta, preparação e identificação” de Pereira et al. (2005).

4.3.3 Processamento das amostras de superfície e fundo de canal

As amostras foram tratadas inicialmente no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geologia da UFRN onde foram lavadas, para retirada do sal, seguindo os mesmos procedimentos descritos no tópico de processamento dos testemunhos. Após a lavagem retirou-se o excesso de água e foi separado uma pequena quantidade de material para fazer a análise granulométrica, o restante foi levado para secar em uma estufa à 60°C e após secas foi retirado 10g para a determinação do teor de carbonato e 10g para matéria orgânica.

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório NUPPRAR da UFRN, no qual foi utilizado o analisador de tamanho de partícula por difração a laser Microtrac S3500 (Figura 23). Esse equipamento mede tamanhos de partículas entre 0,02550 e 2000 μm (fração granulométrica correspondente a argila até areia grossa).

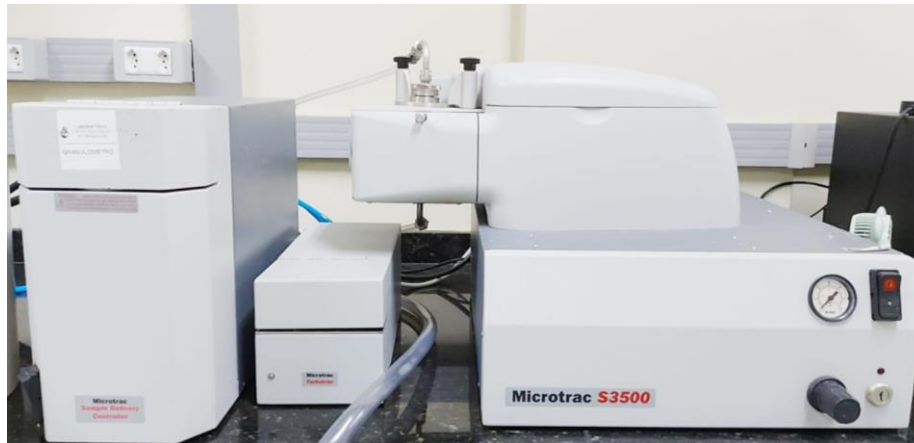


Figura 23: Analisador de tamanho de partícula por difração a laser Microtrac S3500.

O procedimento é realizado com a amostra dispersa no ar ou em um meio líquido adequado. No equipamento o raio laser passa através do meio de dispersão e é difratado pelas partículas. O fundamento dessa análise está no princípio de que partículas possuem dimensões específicas. Dessa forma, quando essas partículas são dispersas em um meio padronizado e expostas a luz incidente, ocorre a absorção e a difração de parte da luz em um ângulo específico. Esse ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula (Papini 2003). O padrão é medido e relacionado à distribuição de tamanho das partículas, seguindo os princípios das teorias de Fraunhofer ou Mie.

Com os procedimentos e análises realizadas, foram geradas tabelas que foram exportados para uma planilha eletrônica e representadas na forma de curvas granulométricas.

A quantificação do teor de carbonato, assim como a quantificação do teor de matéria orgânica foi realizada no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geologia da UFRN seguindo os mesmos procedimentos anteriormente descritos.

4.4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

A partir da base de dados dos testemunhos foi possível confeccionar gráficos para uma melhor representação visual dos resultados. Para a análise litoestratigráfica foram utilizadas a descrição e fotografias dos testemunhos, calibrados com os resultados da perfilagem com o coregama (API, K, Th e U), e características sedimentológicas. Foram produzidas curvas de teor de carbonato de cálcio e teor de matéria orgânica utilizando o Excel. Somado a isso, com as descrições macroscópicas e análises granulométricas foi possível elaborar uma coluna litoestratigráfica para cada testemunho e posterior integração.

Os resultados das análises das amostras de superfície e fundo de canal foram organizados, analisados e correlacionados com as amostras dos testemunhos.

Os dados batimétricos foram analisados no Fledermaus, uma ferramenta de análise geoespacial, da QPS. A partir do produto no formato nuvem de pontos (XYZ) produzido na etapa de processamento foi gerada uma superfície no Fledermaus a partir da qual foram realizadas as análises e obtidas informações tais como profundidade máxima e mínima, identificadas feições de fundo, gerados perfis e produzidos vídeos, entre outras funcionalidades.

A partir dos perfis batimétricos gerados no Fledermaus, em regiões que apresentaram feições de fundo interpretadas como dunas subaquáticas, foram realizadas medições de parâmetros de forma das dunas para fins de classificação. Dentre os parâmetros foram medidos: altura (H); comprimento (L); comprimento da projeção horizontal nos dois flancos da duna, aqui denominados de L1 e L2 (Figura 24); e a partir destes foram calculados dois índices: 1) o índice de ondulação (RI), calculado pela razão L/H ; e 2) o índice de assimetria (AI), calculado pela diferença entre os lados 1 e 2 dividido pelo comprimento $(L1-L2)/L$.

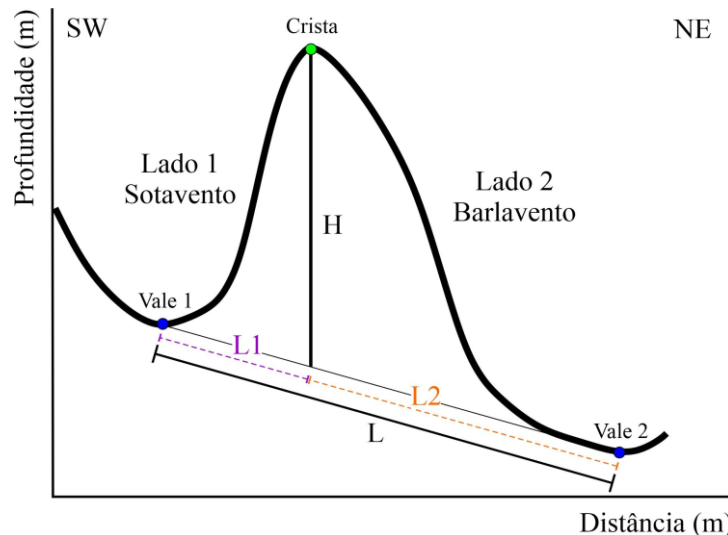


Figura 24: Esquema dos parâmetros geométricos das dunas: H - altura da duna; L - comprimento; L1 e L2 - comprimento da projeção horizontal dos flancos (lado 1 e lado 2).

Para nomenclatura e classificação adotou-se como base a classificação de Ashley (1990), que aplica o termo geral “duna” para formas de leito transversais de fluxo com espaçamento que varia de 0,6 a mais de 100 m e alturas de 0,075 a maiores que 5 m (Tabela 1). Sendo as dunas 2D aquelas que apresentam crista reta e 3D as dunas de crista sinuosa.

Tabela 1: Esquema de Classificação de formas de fundo proposto por Ashley (1990).

Duna Subaquosa				
Descritores de Primeira Ordem (necessários)				
Tamanho: Espaçamento =	Pequena 0,6 - 5 m	Média 5 - 10 m	Grande 10 - 100 m	Muito grande >100 m
Altura =	0,075 - 0,4 m	0,4 - 0,75 m	0,75 - 5 m	>5 m
Forma: 2D - Bidimensional				
3D - Tridimensional				

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 BATIMETRIA MULTIFEIXE

A aplicação da batimetria multifeixe permitiu o reconhecimento da geomorfologia e das feições encontradas no fundo dos canais de maré presentes na área de estudo, desenvolvidas pelas forças atuantes na região.

É importante ressaltar que os resultados aqui apresentados refletem a configuração do canal no momento da aquisição ou por um curto período, uma vez que constitui um ambiente extremamente dinâmico.

Na área de estudo, os canais, com mais de 10 km de extensão, apresentaram-se levemente sinuosos, com profundidades entre 1,3 e -6,3 m, onde as cores quentes correspondem às porções mais rasas e as cores frias indicam as porções mais profundas (Figura 25). As características morfológicas do leito do canal apresentaram-se pouco variáveis, destacando-se além de amplas áreas com o fundo plano, micro-ondulações e regiões com campos de dunas. A profundidade

predominante registrada nos canais foi em torno de -2m, representada pelos tons de verde na Figura 25, e conseqüentemente relevo de fundo predominantemente plano, sem variações abruptas (Figura 25).



Figura 25: Mapa batimétrico dos canais de maré.

A partir de perfis transversais ao longo do curso do canal principal foi possível observar que sua morfologia apresenta uma configuração em “U” (Figura 26). Não foram realizados perfis nas áreas mais rasas. As regiões próximas às margens dos canais de maré estão representadas por valores positivos de profundidade, sendo interpretadas como áreas de planícies de maré, que ficam submersas durante a maré alta, e durante o período de maré baixa chegam a ficar emersas, expostas na superfície. A transição destas para os canais ocorreu de maneira suave, com declive em torno de 13°, como pode ser observado no perfil apresentado na Figura 26.

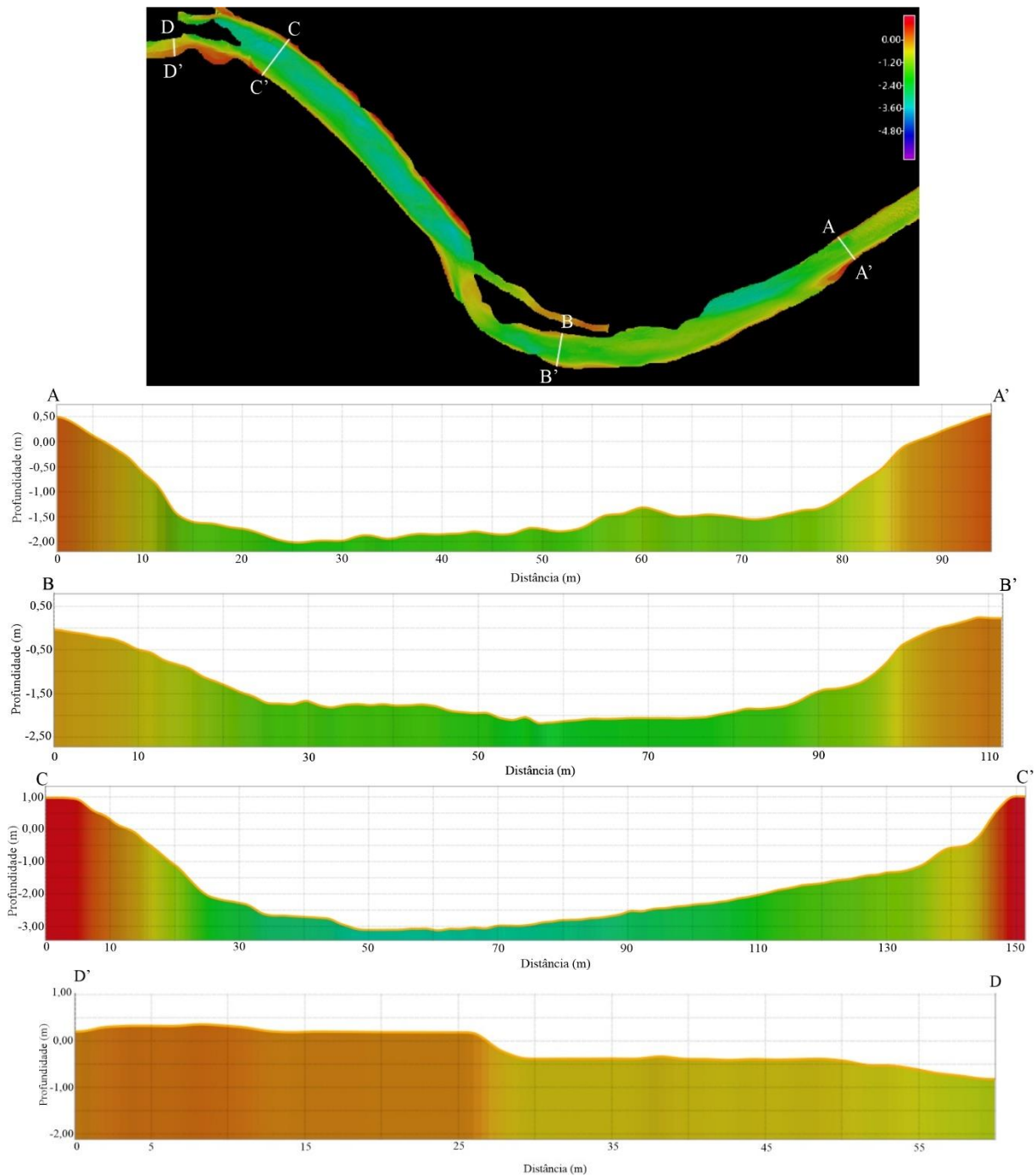


Figura 26: Perfis batimétricos transversais à calha dos canais de maré.

Feições de fundo como dunas subaquáticas foram encontradas em alguns trechos, concentradas nas zonas centrais dos canais. Duas regiões significativas foram identificadas: a primeira localizada na parte mais interna de um canal de maré, próximo ao distrito de Diogo Lopes (Área 1), enquanto a outra foi observada no canal desenvolvido na porção abrigada da ilha do Fernandez (Área 2) (Figura 27).

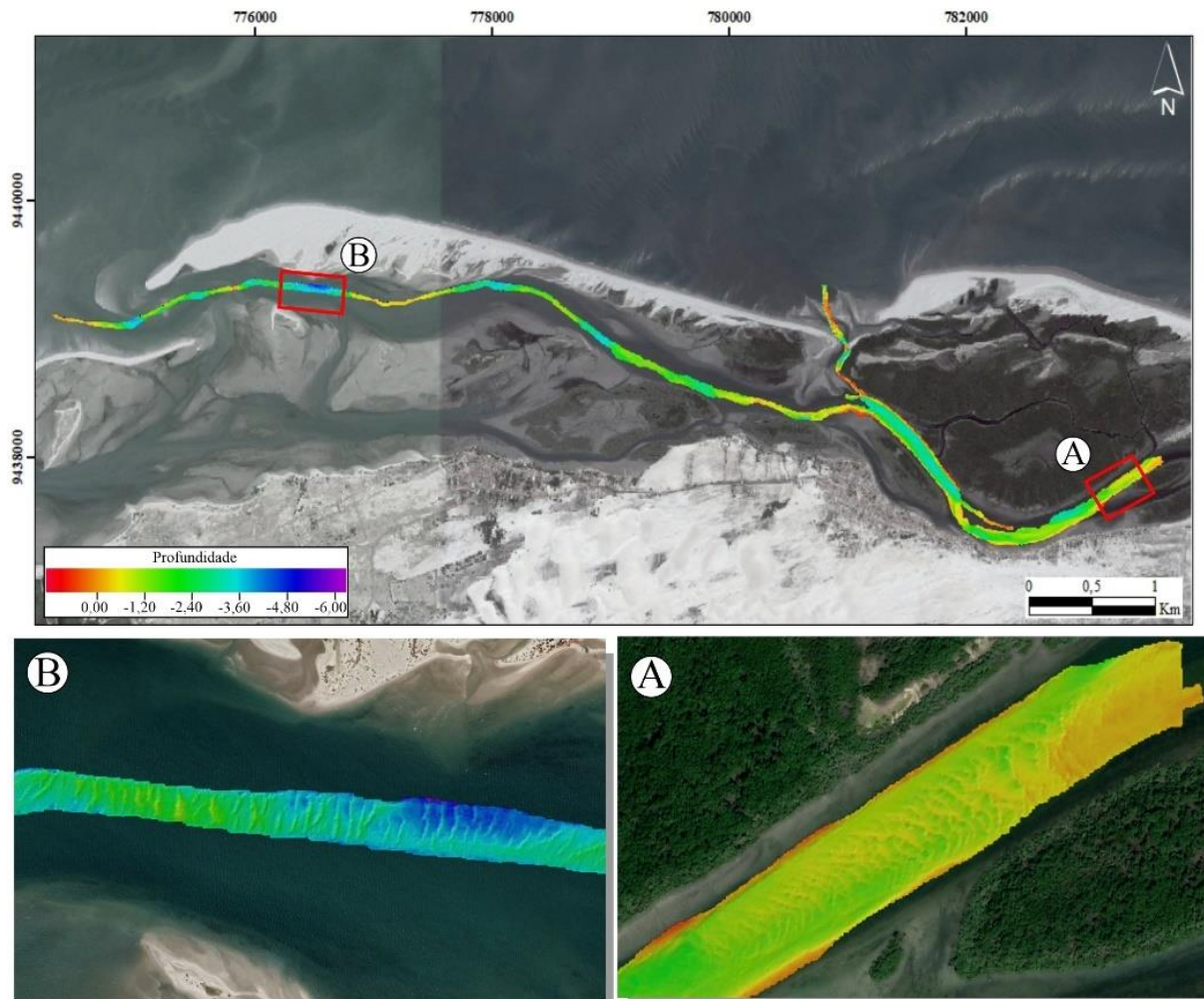


Figura 27: Dunas subaquáticas nos canais de maré de Diogo Lopes. A - Área 1; B - Área 2.

Parâmetros morfológicos das dunas foram medidos com base em perfis realizados a partir dos dados batimétricos (Figura 28). Um resumo dos parâmetros medidos é apresentado na Tabela 2. A Área 1 apresentou dunas distribuídas ao longo de uma faixa de cerca de 410 m de extensão, em uma visão em planta as cristas das dunas apresentaram-se leve a fortemente sinuosas, com algumas bifurcações e ramificações (Figura 28). As dunas encontradas nessa região apresentaram em média 0,40 m de altura, com valor máximo de 0,76 m, na porção central do canal, e mínimo de 0,16m. O espaçamento, medido de vale a vale, teve valor médio de 11,53 m, com máximo de 23,00 m e mínimo de 4,56 m. Dessa forma, as feições encontradas nesse trecho do canal foram classificadas como dunas 3D, pequenas a médias.

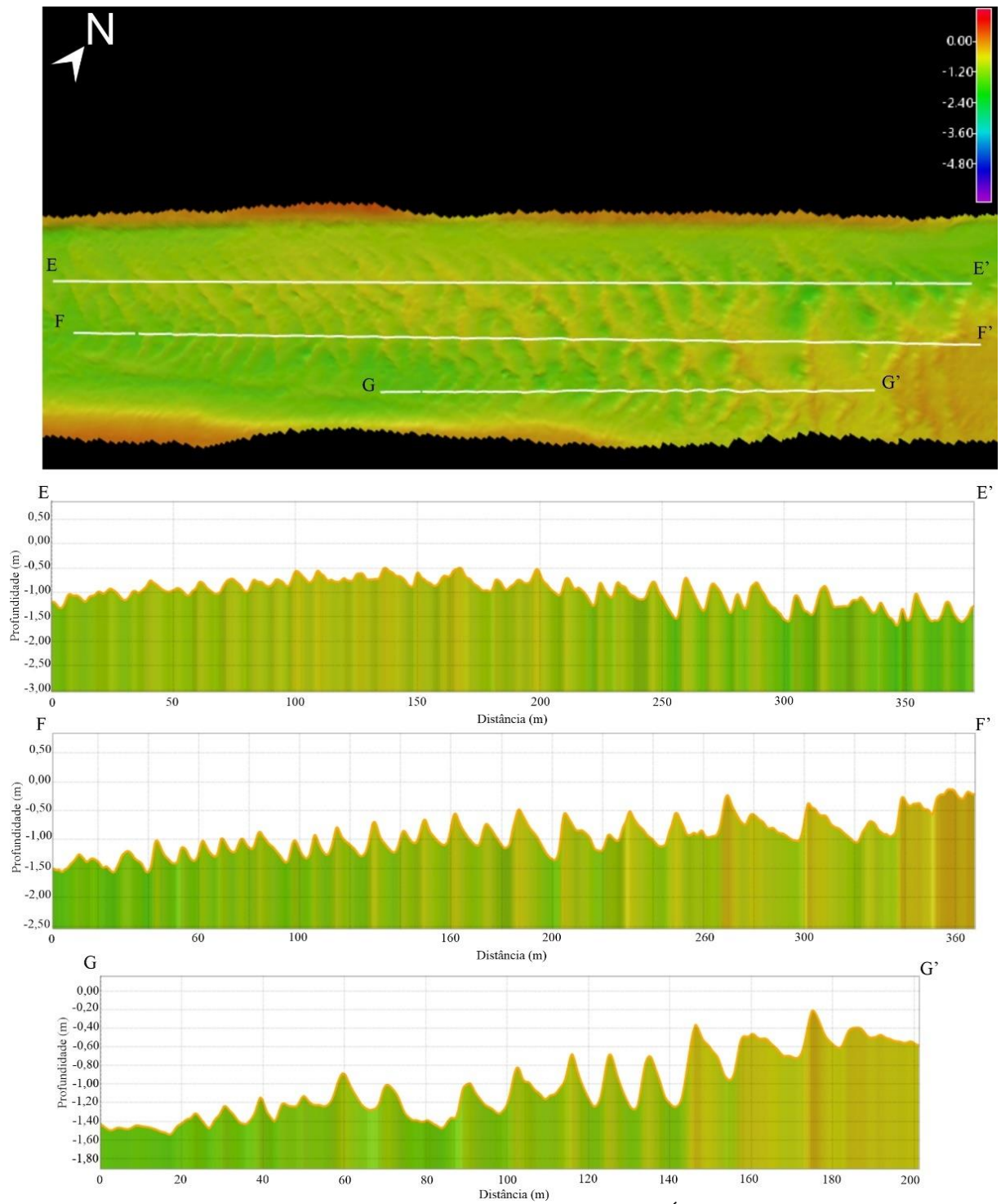


Figura 28: Perfis batimétricos analisados na Área 1.

Tabela 2: Parâmetros morfológicos com base nos dados batimétricos da Área 1.

E - E'						F - F'						G - G'					
H (m)	L (m)	L1 (m)	L2 (m)	RI (L/H)	AI (L1-L2/L)	H (m)	L (m)	L1 (m)	L2 (m)	RI (L/H)	AI (L1-L2/L)	H (m)	L (m)	L1 (m)	L2 (m)	RI (L/H)	AI (L1-L2/L)
0,40	10,01	4,62	5,99	25,09	-0,14	0,32	13,54	5,35	7,81	42,98	-0,18	0,17	8,32	3,94	4,02	48,63	-0,01
0,55	9,79	3,75	6,37	17,83	-0,27	0,65	23,00	4,24	19,04	35,55	-0,64	0,46	10,76	4,27	6,26	23,60	-0,18
0,28	4,56	2,12	2,25	16,52	-0,03	0,24	20,95	2,60	18,30	87,66	-0,75	0,40	17,03	5,45	11,17	42,26	-0,34
0,30	9,34	2,83	6,45	31,45	-0,39	0,62	12,52	5,95	6,99	20,29	-0,08	0,76	14,50	4,90	8,37	19,20	-0,24
0,49	9,45	5,12	3,75	19,17	0,14	0,48	10,73	5,28	5,58	22,40	-0,03	0,55	10,01	3,66	6,24	18,10	-0,26
0,48	9,45	3,09	6,10	19,69	-0,32	0,53	17,37	5,06	12,79	33,02	-0,44	0,56	9,78	3,84	6,02	17,53	-0,22
0,61	17,68	4,69	12,70	29,03	-0,45	0,19	7,15	3,24	3,51	36,86	-0,04	0,52	12,16	6,63	5,50	23,20	0,09
0,33	5,78	2,79	3,10	17,36	-0,05	0,76	17,63	4,25	13,72	23,29	-0,54	0,43	11,74	4,54	6,80	27,37	-0,19
0,57	11,34	4,03	7,28	19,89	-0,29	0,72	18,65	5,01	14,05	26,08	-0,48	0,40	14,37	6,76	7,16	36,20	-0,03
0,74	11,12	4,18	6,97	15,05	-0,25	0,36	12,07	3,48	7,84	33,34	-0,36	0,31	10,67	4,35	6,20	34,98	-0,17
0,48	14,12	5,27	9,14	29,54	-0,27	0,52	12,78	4,57	8,71	24,67	-0,32	0,37	11,68	5,07	6,52	31,90	-0,12
0,31	12,42	2,81	9,18	40,59	-0,51	0,40	11,75	3,92	7,73	29,60	-0,32	0,26	7,28	3,46	3,38	28,20	0,01
0,39	7,34	2,62	4,69	18,72	-0,28	0,28	8,43	3,70	4,25	30,11	-0,07	0,21	8,73	4,02	5,15	41,97	-0,13
0,37	13,12	4,12	8,69	35,17	-0,35	0,55	12,78	5,01	7,95	23,15	-0,23	0,18	9,61	6,28	3,30	52,22	0,31
0,42	19,57	10,02	9,28	46,82	0,04	0,47	13,80	3,92	9,80	29,61	-0,43						
0,29	9,23	2,50	7,36	31,94	-0,53	0,37	7,92	3,05	4,90	21,35	-0,23						
0,27	14,12	2,80	10,90	52,10	-0,57	0,34	8,18	3,03	4,22	23,99	-0,14						
0,22	7,67	3,24	4,12	34,24	-0,11	0,33	13,75	3,20	10,55	41,92	-0,53						
0,28	9,01	3,54	5,60	32,18	-0,23	0,19	7,35	3,28	3,80	38,48	-0,07						
0,16	7,45	3,68	4,12	47,45	-0,06	0,28	7,11	2,42	4,84	25,85	-0,34						
0,28	12,23	6,05	5,92	43,06	0,01	0,30	8,42	3,28	5,01	28,26	-0,20						
0,27	11,45	4,76	6,82	42,57	-0,18	0,26	8,23	3,28	4,67	32,15	-0,17						
0,24	12,01	5,15	7,07	49,42	-0,16	0,49	10,44	3,37	7,17	21,22	-0,36						
						0,36	13,60	5,79	7,95	37,57	-0,16						

O índice de ondulação (RI), de acordo com Reineck e Singh (1980) permite distinguir as ondulações geradas por onda e por corrente, segundo esses autores, as ondulações geradas por ondas apresentam RI menor que 4, enquanto as geradas por corrente irão apresentar RI maior que 15. O valor de RI para as dunas da Área 1 variou entre 88 e 15, com média de 32, indicando que essas dunas foram geradas por corrente. O índice de assimetria (AI), de acordo com Durán et al. (2018), pode apresentar valores positivos e negativos, onde $AI > 0$ indica uma assimetria com fluxo no sentido do lado 1 para o lado 2, enquanto para $AI < 0$ a assimetria possui um fluxo no sentido do lado 2 para o lado 1. Para a Área 1 os valores de AI variaram entre 0,31 e -0,75, com valor médio de -0,23, indicando que as dunas apresentam perfis transversais assimétricos, tendo a maioria apresentando fluxo no sentido do lado 2 para o lado 1, com a vertente mais acentuada voltada para sudoeste, que corresponde a direção do fluxo da corrente de maré vazante residual, podendo classificar essas dunas como feições dominadas pela vazante.

Conforme estudos desenvolvidos no canal de maré da Barra Nova, próximo à área de estudo, a intensidade das correntes de maré vazante na região é maior do que as de maré enchente ao longo de todo o ano. No interior desse canal de maré as correntes medidas apresentaram intensidades máxima, da ordem de 0,85m/s, em períodos de maré vazante nos meses de agosto 2006 e fevereiro 2007 (Vital et al., 2008).

A Área 2, possui dunas distribuídas em uma superfície com cerca de 650 m de extensão, na visão em planta as cristas são retilíneas a levemente sinuosas, com poucas bifurcações (Figura 29). A Tabela 3 apresenta os parâmetros medidos a partir dos perfis batimétricos da

Figura 29. Nessa área as dunas registraram em média 0,72 m de altura, com valor mínimo de 0,20 m e máximo de 1,46 m. O espaçamento médio medido foi de 14,91 m, com 27,24 m de valor máximo e mínimo de 5,88 m. Com essas características as feições dessa porção do fundo do canal podem ser classificadas como dunas 2D a 3D, médias a grandes.

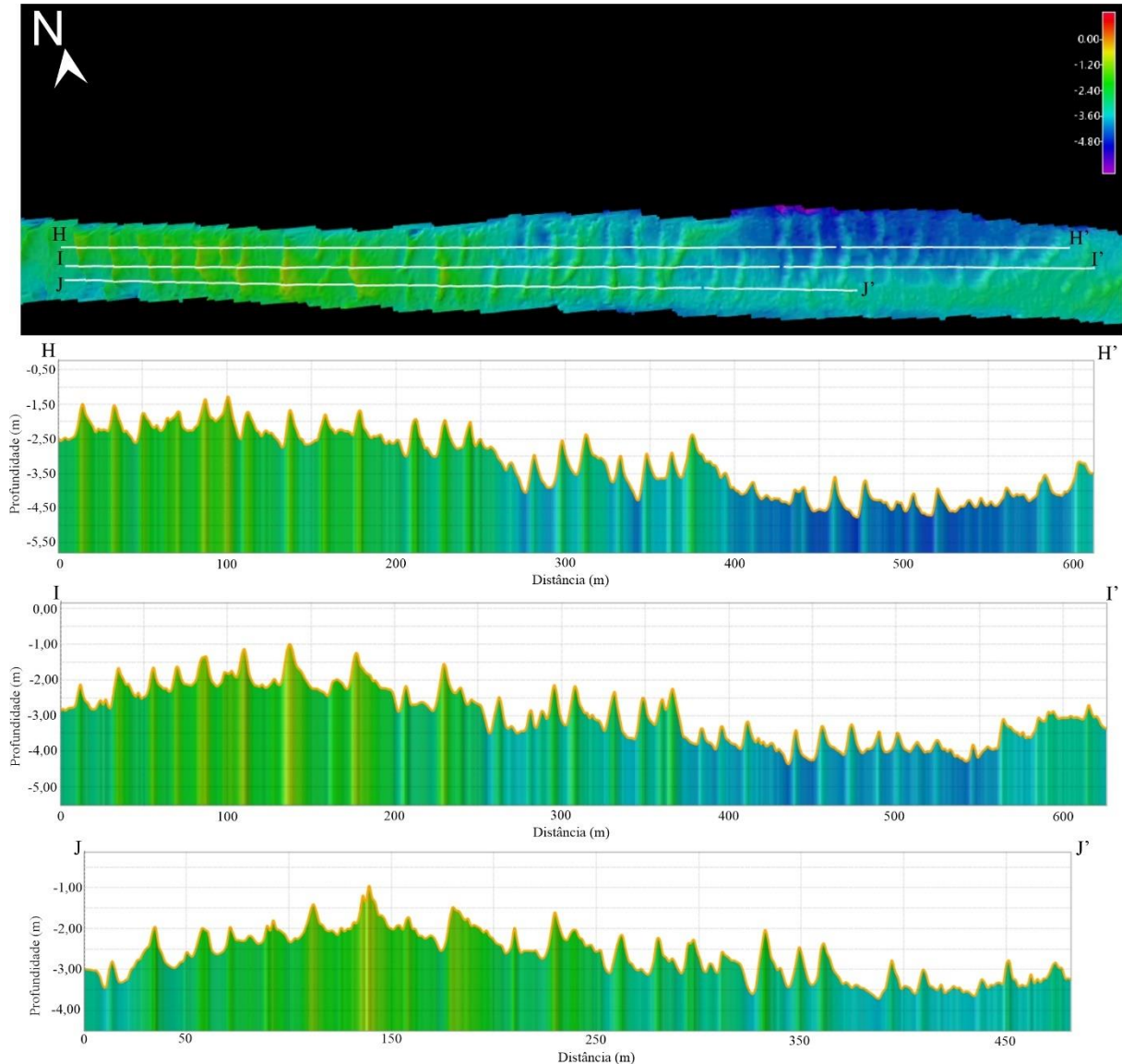


Figura 29: Perfis batimétricos analisados na Área 2.

O índice de ondulação (RI) calculado para as feições da Área 2 ficou entre 59 e 12, com média de 23, o que indica que as dunas foram geradas por corrente. O índice de assimetria (AI) na Área 2 variou entre 0,51 e -0,50, com valor médio de -0,10, indicando que as dunas apresentam perfis transversais assimétricos. A maioria das dunas apresentaram fluxo no sentido do lado 2 para o lado 1, tendo a vertente mais acentuada voltada para oeste, que corresponde a direção do fluxo da vazante residual, predominante na região, classificando essas dunas como feições dominados pela vazante, semelhante ao observado na Área 1.

Tabela 3: Parâmetros morfológicos com base nos dados batimétricos da Área 2.

H - H'						I - I'						J - J'					
H (m)	L (m)	L1 (m)	L2 (m)	RI (L/H)	AI (L1-L2/L)	H (m)	L (m)	L1 (m)	L2 (m)	RI (L/H)	AI (L1-L2/L)	H (m)	L (m)	L1 (m)	L2 (m)	RI (L/H)	AI (L1-L2/L)
0,61	24,52	13,71	10,52	40,47	0,13	0,32	7,32	3,77	3,30	23,01	0,06	0,50	6,27	3,64	2,62	12,62	0,16
0,66	19,44	8,99	10,34	29,64	-0,07	0,20	10,49	4,11	6,23	51,41	-0,20	0,29	9,22	5,18	3,88	32,13	0,14
0,69	14,41	4,74	9,83	20,76	-0,35	0,69	19,23	6,85	13,32	27,87	-0,34	0,46	9,44	5,18	3,97	20,71	0,13
0,52	14,20	4,78	10,29	27,14	-0,39	0,37	7,59	4,04	3,36	20,36	0,09	0,74	13,00	7,63	5,76	17,54	0,14
0,81	17,04	6,98	10,25	20,96	-0,19	0,28	9,88	5,92	4,01	35,80	0,19	0,97	15,22	5,37	9,67	15,67	-0,28
0,98	19,44	5,75	13,81	19,94	-0,41	0,27	10,61	4,54	5,81	39,45	-0,12	0,91	11,42	5,00	6,30	12,57	-0,11
0,43	15,88	6,30	9,55	36,75	-0,20	0,50	13,84	6,73	6,75	27,91	-0,00	1,46	18,35	6,31	11,91	12,59	-0,30
0,39	11,31	6,59	4,72	28,70	0,16	0,55	10,45	9,78	4,46	19,03	0,51	0,72	11,70	4,66	6,89	16,25	-0,19
1,00	19,17	8,56	10,72	19,15	-0,11	0,80	11,65	4,47	6,70	14,66	-0,19	0,72	14,58	7,27	7,37	20,24	-0,01
0,70	11,28	6,01	5,29	16,18	0,06	0,90	19,14	6,27	13,17	21,36	-0,36	0,88	13,57	6,13	7,60	15,41	-0,11
1,04	20,87	8,72	12,44	20,12	-0,18	0,88	14,30	4,48	9,82	16,33	-0,37	0,85	17,65	9,29	8,32	20,69	0,05
0,83	20,21	6,10	14,45	24,24	-0,41	0,65	11,11	5,41	5,83	17,03	-0,04	0,58	7,62	4,00	3,38	13,25	0,08
0,92	17,77	7,37	10,23	19,29	-0,16	0,62	15,33	3,96	10,86	24,84	-0,45	0,70	25,39	11,38	13,00	36,53	-0,06
1,11	17,68	8,10	10,31	15,90	-0,12	0,48	12,09	4,24	8,66	25,04	-0,37	0,28	5,88	2,77	2,59	20,84	0,03
0,96	15,01	5,52	10,16	15,59	-0,31	0,79	25,19	8,98	16,48	31,84	-0,30	0,79	13,47	6,61	6,73	17,05	-0,01
0,34	20,29	5,38	15,62	58,99	-0,50	0,45	14,91	8,46	6,63	32,91	0,12	0,73	15,21	7,43	7,70	20,89	-0,02
0,64	9,53	7,21	3,59	14,91	0,38	0,96	16,73	7,68	10,02	17,52	-0,14	0,47	14,23	7,58	6,35	30,21	0,09
0,90	15,58	5,56	8,77	17,38	-0,21	1,10	19,51	6,38	12,15	17,67	-0,30	0,63	12,39	5,43	7,16	19,60	-0,14
1,04	17,25	5,42	11,61	16,63	-0,36	0,91	15,39	7,64	8,20	16,91	-0,04	1,12	27,24	16,96	10,00	24,26	0,25
0,71	11,21	4,08	6,99	15,83	-0,26	0,97	11,85	4,70	7,52	12,22	-0,24	0,56	9,27	4,22	5,54	16,64	-0,14
0,64	18,34	10,77	6,88	28,84	0,21	0,50	7,96	6,18	3,81	16,08	0,30						
1,01	14,85	4,96	10,13	14,75	-0,35	0,89	11,62	5,40	5,67	13,03	-0,02						
0,70	12,49	4,61	8,12	17,92	-0,28	0,25	12,14	4,75	7,49	47,81	-0,23						
0,92	19,46	9,86	9,85	21,20	0,00	1,05	19,63	10,06	10,19	18,69	-0,01						
0,70	14,47	9,81	7,05	20,58	0,19	0,62	9,09	5,45	4,33	14,73	0,12						
0,72	17,77	5,82	12,00	24,71	-0,35	0,89	16,42	6,07	10,24	18,40	-0,25						
0,84	23,11	8,56	13,55	27,68	-0,22	0,35	13,28	5,83	7,45	37,83	-0,12						
0,86	20,56	8,84	11,82	23,96	-0,14	1,16	19,97	6,76	14,02	17,23	-0,36						
						0,87	14,13	6,34	8,01	16,16	-0,12						
						0,81	17,00	8,34	7,60	21,09	0,04						
						0,63	12,49	4,93	7,85	19,76	-0,23						
						0,68	13,82	5,47	7,66	20,41	-0,16						
						0,78	21,56	10,28	11,51	27,79	-0,06						
						0,62	12,35	5,23	7,72	20,02	-0,20						

A Área 2 está localizado em uma região onde a profundidade aumenta em relação a Área 1, este último, por estar na porção mais interna do sistema, espera-se estar submetido a uma menor velocidade da corrente, justificando a existência de dunas de tamanho um pouco menor nessa área. Enquanto a Área 2 está numa região onde se tem uma maior energia das correntes atuantes, gerando assim formas de leito de tamanho maior.

Dunas subaquáticas também foram descritas por Costa Neto (2009), no Sistema Pisa Sal do complexo estuarino lagunar de Galinhos e Guamaré. As feições descritas foram de pequeno, médio e grande comprimento, com perfil assimétrico e vergência para vazante. De acordo com o referido autor, a assimetria de duração e de velocidade das correntes permite que estas dunas não sejam destruídas, nem revertam sua vergência no sentido da maré enchente, contudo, marcas de ondas que ocorrem sobrepostas podem ser destruídas e/ou inverter a sua direção de fluxo.

5.2 SEDIMENTOS DE SUPERFÍCIE E FUNDO DE CANAL

De modo a caracterizar os depósitos encontrados no sistema de ilhas barreiras/pontais arenosos foram coletadas amostras em 10 pontos nos seus diferentes subambientes. As amostras foram analisadas quanto a sua granulometria, teor de matéria orgânica e teor de carbonato de cálcio.

As amostras DL-01 (Figura 30) foram coletadas em uma região de ilha interiorizada, por trás da ilha Corta Cachorro, na margem de um canal de maré secundário; nesse ponto foram identificados dois ambientes, uma área de planície de maré, próximo ao canal, transicionando para feições dunares em direção ao centro da ilha. As amostras foram coletadas na região intermaré, uma na parte mais interna da ilha (DL-01 A) e outra na parte mais próxima à margem do canal (DL-01 B). Em ambas as amostras as frações predominantes são areia fina e muito fina, destacando-se na amostra B a presença de quantidade significativa de material na fração silte (>20%). Os teores registrados de matéria orgânica foram de 0,53 e 0,85%, e carbonato de cálcio 1,26 e 2,63%.



Figura 30: Visualização do local e do material das amostras DL-01 A e B.

A amostra DL-02 (Figura 31) foi coletada no fundo do canal de maré Casqueira, próximo a abertura para o oceano, que separa a ilha barreira Corta Cachorro do pontal arenoso de Soledade. Essa amostra é composta por uma grande quantidade de conchas, fragmentos de conchas e fragmentos de coral; as frações granulométricas predominantes são cascalho e areia grossa a média. Os teores de carbonato de cálcio e matéria orgânica registrados foram de 20,80% e 0,17% respectivamente.

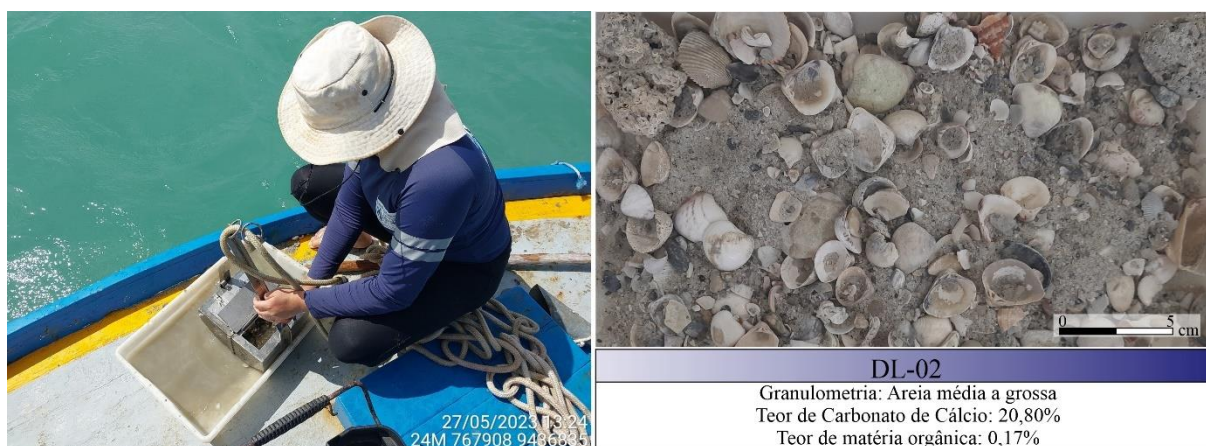


Figura 31: Visualização do local e do material da amostra DL-02.

A amostra DL-03 (Figura 32) foi coletada em uma região onde se formou um delta de maré vazante, na entrada do canal entre a ilha barreira Corta Cachorro e o pontal arenoso Soledade,

este depósito apresenta um formato alongado, na direção N-NE/S-SW, contendo feições como marcas onduladas subaquáticas em alguns trechos de sua exposição. O material apresenta predominantemente areia fina, com pouquíssimos fragmentos de concha. O teor de carbonato de cálcio para essa amostra foi de 4,41% e o teor de matéria orgânica foi de 0,56%.



Figura 32: Visualização do local e do material da amostra DL-03.

A amostra DL-04 (Figura 33) foi coletada no fundo de um canal de maré próximo à ilha barreira Ponta do Tubarão; o material apresenta granulometria areia fina a média, contendo alguns pequenos fragmentos de conchas. O teor de carbonato de cálcio registrado foi de 8,80% e teor de matéria orgânica 1,30%, sendo o maior valor entre as amostras analisadas.



Figura 33: Visualização do local e do material da amostra DL-04.

A amostra DL-05 (Figura 34) foi coletada em uma ampla região de planície de maré entre as ilhas barreira Ponta do Tubarão e Fernandez, nessa área foi observada a presença de conchas e fragmentos de conchas, desenvolvimento de musgo e marcas onduladas na superfície. É composta por muito fina a fina, com uma quantidade de silte >12%; apresenta tanto conchas inteiras quanto fragmentos de concha. O teor de carbonato de cálcio para essa amostra foi da ordem de 20%, e o teor de matéria orgânica, por sua vez, foi de 0,71%.

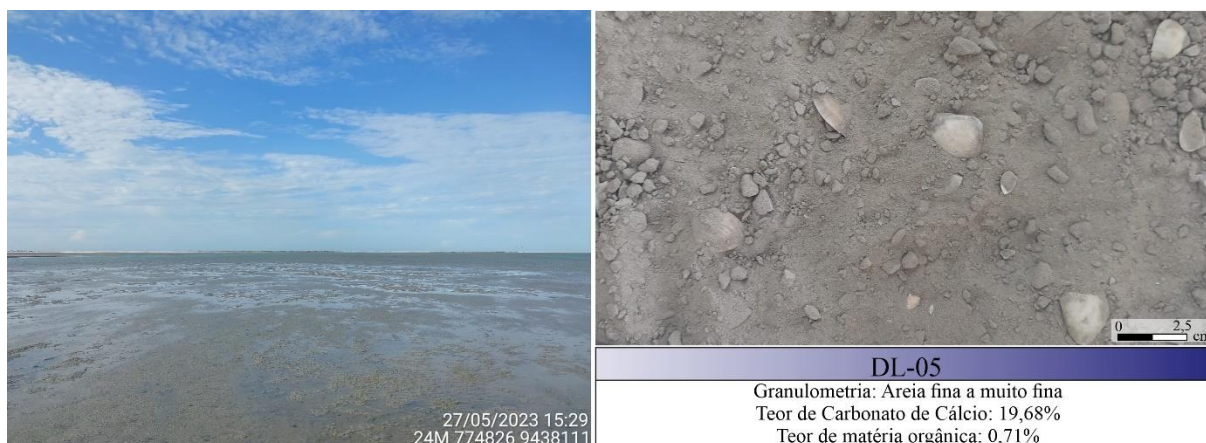


Figura 34: Visualização do local e do material da amostra DL-05.

A amostra DL-06 (Figura 35) foi coletada em uma região de delta de maré enchente, formado próximo a abertura do canal que separa a ilha do Fernandez do pontal Costa de Cima, nessa exposição foram encontradas marcas onduladas subaquáticas, clastos de lama decimétricos, trechos com concentração de conchas inteiras, fragmentos de conchas, galhos e raízes de plantas. A granulometria predominante dessa amostra foi areia média, o teor de matéria orgânica foi de 0,61% e o teor de carbonato de cálcio foi de 5,92%.



Figura 35: Visualização do local e do material da amostra DL-06.

A amostra DL-07 (Figura 36) foi coletada no canal de maré que margeia o distrito de Diogo Lopes. Nessa amostra foi observada a presença de algumas conchas inteiras e fragmentos de conchas, a granulometria predominante foi areia média a fina com um pouco de areia fina e uma pequena quantidade de silte (5%). O teor de matéria orgânica foi de 0,97% e o teor de carbonato de cálcio 3,63%.

A amostra DL-08 (Figura 36), coletada na porção intermaré da margem do canal próximo a Diogo Lopes, é caracterizada pela predominância de areia média com areia fina e um pouco de silte (~5%) subordinadamente, apresenta também algumas conchas e fragmentos de conchas. O teor de carbonato de cálcio foi de 3,13% e matéria orgânica 0,26%.

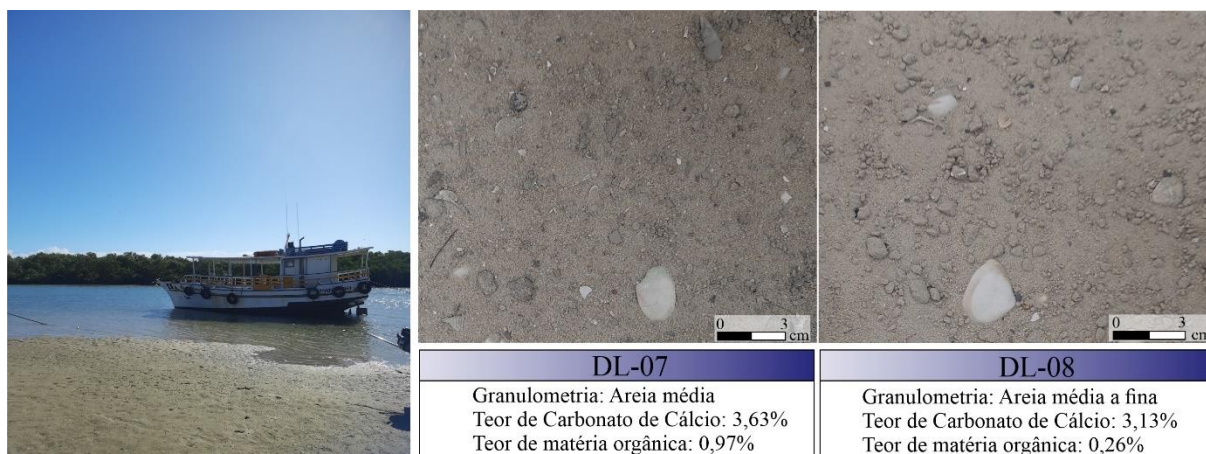


Figura 36: Visualização do local e do material das amostras DL-07 e DL-08.

As amostras DL-09 (Figura 37) foram coletadas na ilha barreira Fernadez, na porção próxima a sua “cauda”. Uma das amostras (DL-09 A) foi coletada na região de espriamento (*swash*), na face da ilha voltada para o oceano, em uma visão geral, nessa área destaca-se a presença de vegetação na face de praia e pós-praia, presença de algumas conchas. Em um corte realizado no sedimento foi possível observar pequenos níveis com material de coloração mais escura, provavelmente correspondente a intervalos com maior quantidade de minerais pesados. A sua granulometria é composta por areia fina a média, sem considerável presença de concha/fragmentos; o teor de matéria orgânica foi de 0,09% e o teor de carbonato de cálcio foi de 3,52%. Uma outra amostra (DL-09 B) foi coletada na região por trás da ilha, em uma área submetida a sobrelavagem (depósito de sobrelavagem) onde se destaca a presença de “línguas” de sobrelavagem, com muitas conchas e fragmentos de concha associados. Essa amostra é composta predominantemente por areia média, com areia grossa e fina subordinada. O teor de carbonato de cálcio foi de 7,35% e o de matéria orgânica foi de 0,11%.

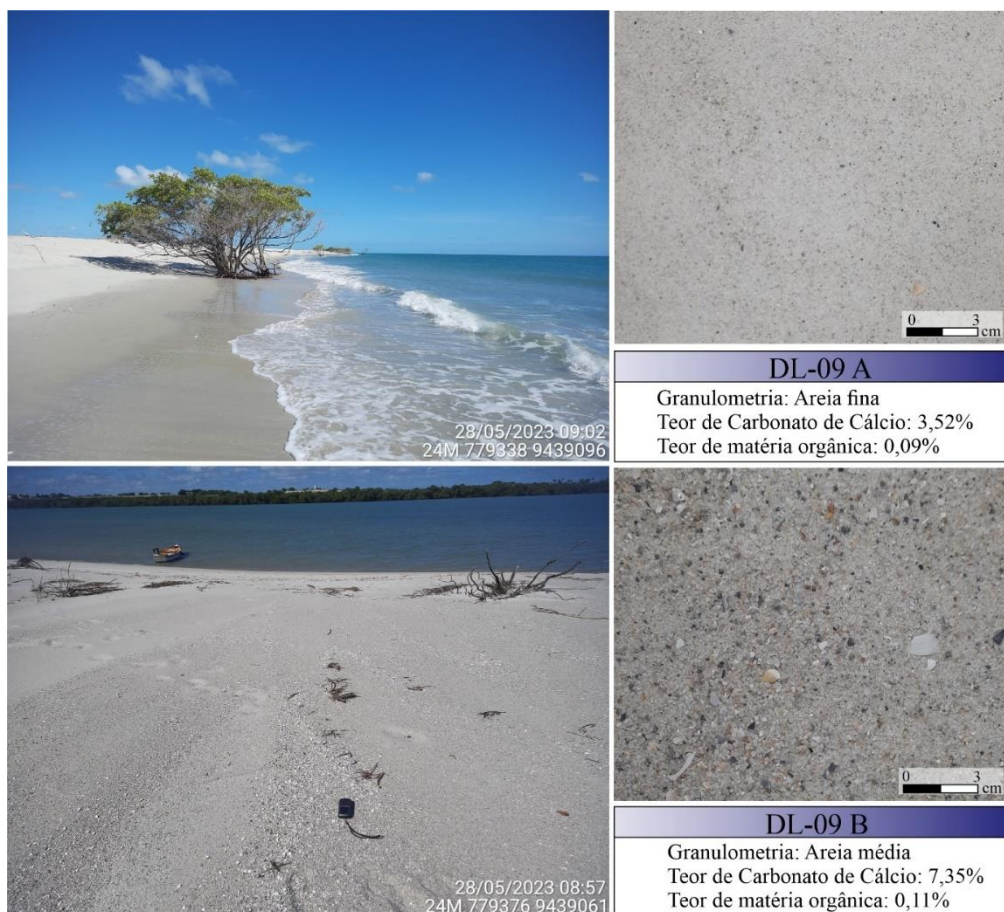


Figura 37: Visualização do local e do material das amostras DL-09 A e B.

As amostras DL-10 (Figura 38) foram coletadas na região de espriamento na “cabeça” do pontal arenoso Costa de Cima, uma em sua face voltada para o oceano (DL-10 A) e outra na face voltada para o canal de maré (DL-10 B). Essas amostras apresentaram granulometria semelhante, sendo caracterizada predominantemente por areia fina com um pouco de areia média, e presença de algumas conchas e fragmentos de conchas. O teor de carbonato de cálcio foi de 3,07% para a amostra A e 2,52% para a B. O teor de matéria orgânica da amostra A, do lado para o oceano, foi de 0,10%, um pouco menor que do lado voltado para o canal, que registrou 0,34%.

A partir dos resultados obtidos foi possível classificar as amostras de acordo com Vital et al. (2005b) adaptado de Freire et al. (1997), para a plataforma continental do nordeste do Brasil (Tabela 4).

A maioria das amostras apresentou características que permitiram classificá-las como areia siliciclástica, por apresentarem conteúdo de sedimentos lamosos e quantidade de material maior que 2mm inferior a 15%. A amostra DL-02, na desembocadura do canal de maré, foi a única classificada como areia siliciclástica com grânulos e cascalhos, tendo apresentado mais de 30% de sedimento maior que 2mm. Já a amostra DL-01 B, coletada na margem de um canal de maré,

que apresentou uma quantidade de sedimentos lamosos em torno de 22%, foi classificada como lama terrígena.



Figura 38: Visualização do local e do material das amostras DL-10 A e B.

Tabela 4: Características e classificação das amostras de superfície e fundo de canal.

Amostra	Localização	Granulometria	Teor de Carbonato de Cálcio	Teor de Matéria Orgânica	Classificação
DL-01 A	Planície de Maré	Areia Fina	1,26%	0,53%	Areia Siliciclástica
DL-01 B	Planície de Maré	Areia Fina (silte > 22%)	2,63%	0,85%	Lama Terrígena
DL-02	Desembocadura de Canal de Maré	Areia média a grossa com cascalho (>30%)	20,80%	0,17%	Areia Siliciclástica com grânulos e cascalho
DL-03	Delta de Maré Vazante	Areia Fina	4,41%	0,56%	Areia Siliciclástica
DL-04	Canal de Maré	Areia Fina	8,80%	1,30%	Areia Siliciclástica
DL-05	Planície de Maré	Areia fina a muito fina	19,68%	0,71%	Areia Siliciclástica
DL-06	Delta de Maré Enchente	Areia média	5,92%	0,61%	Areia Siliciclástica
DL-07	Canal de Maré	Areia média	3,63%	0,97%	Areia Siliciclástica
DL-08	Planície de Maré	Areia média	3,13%	0,26%	Areia Siliciclástica
DL-09 A	Ilha Barreira (espraçamento)	Areia fina	3,52%	0,09%	Areia Siliciclástica
DL-09 B	Ilha Barreira (sobrelavagem)	Areia média	7,35%	0,11%	Areia Siliciclástica
DL-10 A	Pontal arenoso (espraçamento lado oceano)	Areia fina	3,07%	0,10%	Areia Siliciclástica
DL-10 B	Pontal arenoso (espraçamento lado canal)	Areia fina	2,52%	0,34%	Areia Siliciclástica

Os diferentes depósitos caracterizados nessa região apresentaram características equivalentes à depósitos encontrados em regiões com configurações semelhantes. De acordo com Costa Neto (2009), na região do Complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré, se desenvolvem depósitos de maré caracterizados por uma sequência sedimentar constituída de areias, areias lamosas, lamas arenosas e lamas, correlacionados às planícies de supramaré e intermaré.

Ainda segundo o autor supracitado, na região ocorre também depósitos de areias grossas e lamas com grandes quantidades de bivalves e gastrópodes no centro de canais de maré; conforme seu estudo, os sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal, em Galinhos, tem uma predominância da fração areia em relação à fração lamosa, ocorrendo no centro dos canais classes arenosas mais grossas, refletindo a alta energia das correntes nessas zonas, com as classes mais finas ocorrendo próximo às margens, indicando uma baixa energia das correntes. Costa Neto (2009) destaca características distintas apresentadas entre as margens do canal, onde de um lado predomina areia muito fina e silte, enquanto o mesmo trecho da margem oposta apresenta areia média e fina.

Na foz do complexo estuarino lagunar, assim como na área de estudo, ainda se desenvolvem deltas de maré vazante formados por depósitos de argila e areia fina, de

composição quartzosa e biodetrítica, mal selecionadas, que afloram durante a maré baixa. Depósitos de praias atuais, relacionados a zona de estirâncio (*swash*), na região são compostos por areias quartzosas, fragmentos de conchas (biodetritos) e minerais pesados, granulometria fina a grossa, bem selecionada.

5.3 TESTEMUNHOS

Foi realizada a análise de 26 testemunhos de material sedimentar, dentre os quais obteve-se informações acerca da granulometria, perfil de raios gama, teores de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

Dentre os 26 testemunhos, 13 encontram-se localizados em um contexto de praia/ilha barreira, 12 localizam-se em um ambiente de manguezal e 1 encontram-se em uma antiga ilha barreira, atualmente localizada um segmento mais próximo ao continente.

Os testemunhos que se encontram na região de praia/ilha-barreira foram analisados de acordo com Rocha et al. (2021), que caracterizou depósitos dessa região. O grupo de testemunhos ARPrI foi coletado próximo ao distrito de Diogo Lopes, na chamada Barra do Cabeção, a nordeste dos demais testemunhos. Nesses testemunhos foi recuperado material sedimentar até quase 2 metros de profundidade. O perfil de raio gama apresentou maiores valores na base do testemunho, caracterizando a presença de sedimentos de granulometria mais fina. Em direção ao topo os valores de raio gama diminuem, sendo indicativo de sedimentos mais grossos que na porção inferior; esse padrão indica uma granocrescência ascendente, sugerindo um aumento da energia de deposição.

O intervalo inferior dos testemunhos (da base até 110 cm) é constituído por areia muito fina a fina, pobre a moderadamente selecionada, com quantidade significativa de sedimento na fração silte (> 15%) e alguns níveis de areia média. Os teores de carbonato de cálcio apresentaram os maiores valores dentre todos os testemunhos (entre 22,18% e 32,36%). Os 110 cm iniciais são compostos por areia média moderadamente selecionada, que grada para areia fina pobre a moderadamente selecionada nas porções superficiais (Figura 39).

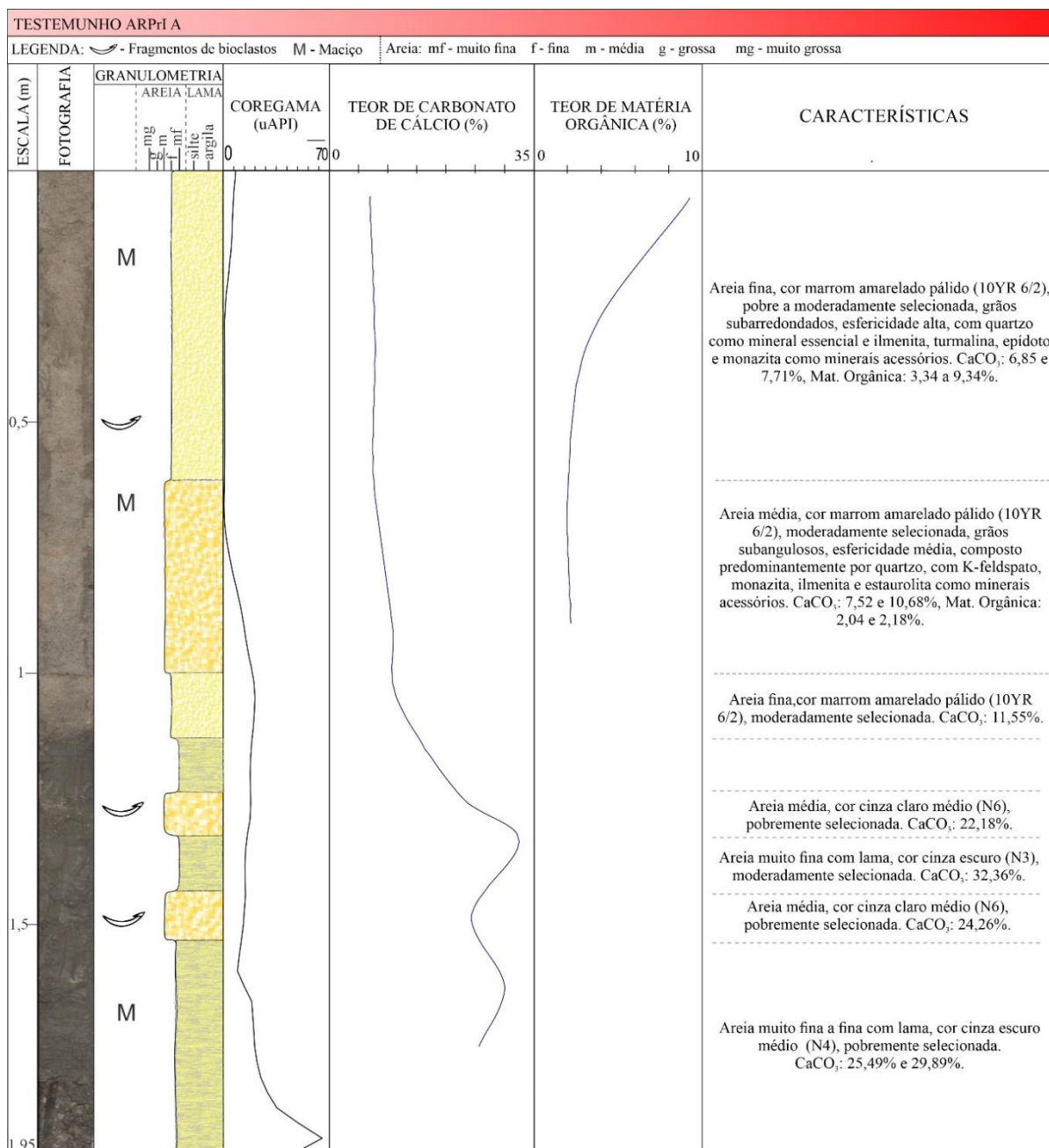


Figura 39: Carta de análise sedimentológica para o testemunho ARPrI A, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

Os testemunhos CPrI1 foram obtidos na margem voltada para o oceano da extremidade leste do pontal arenoso conhecido como Soledade. Esses testemunhos apresentaram dois ciclos com granocrescência ascendente, na qual o tamanho do grão aumenta gradualmente em direção ao topo, indicando um aumento da energia no sistema durante a deposição de cada ciclo. Nas porções inferior e intermediária, os sedimentos apresentaram granulometria areia muito fina a fina, de coloração cinza escuro, pobre a moderadamente selecionado, com alguns intervalos contendo quantidades significativas de silte, além de apresentar fragmentos de conchas. A parte superior dos testemunhos (de cerca de 30/50 cm até o topo) é composta por areia fina a média,

que grada para areia média a grossa nas porções mais superficiais, pobremente selecionada, com conteúdo significativo de bioclastos (Figura 40).

Os teores de carbonato e matéria orgânica apresentaram a mesma tendência nos três testemunhos desse grupo, com uma diminuição dos teores em direção ao topo. Os valores do teor de carbonato (5,33% a 23,55%) são superiores aos de matéria orgânica (0,93% a 9,04%).

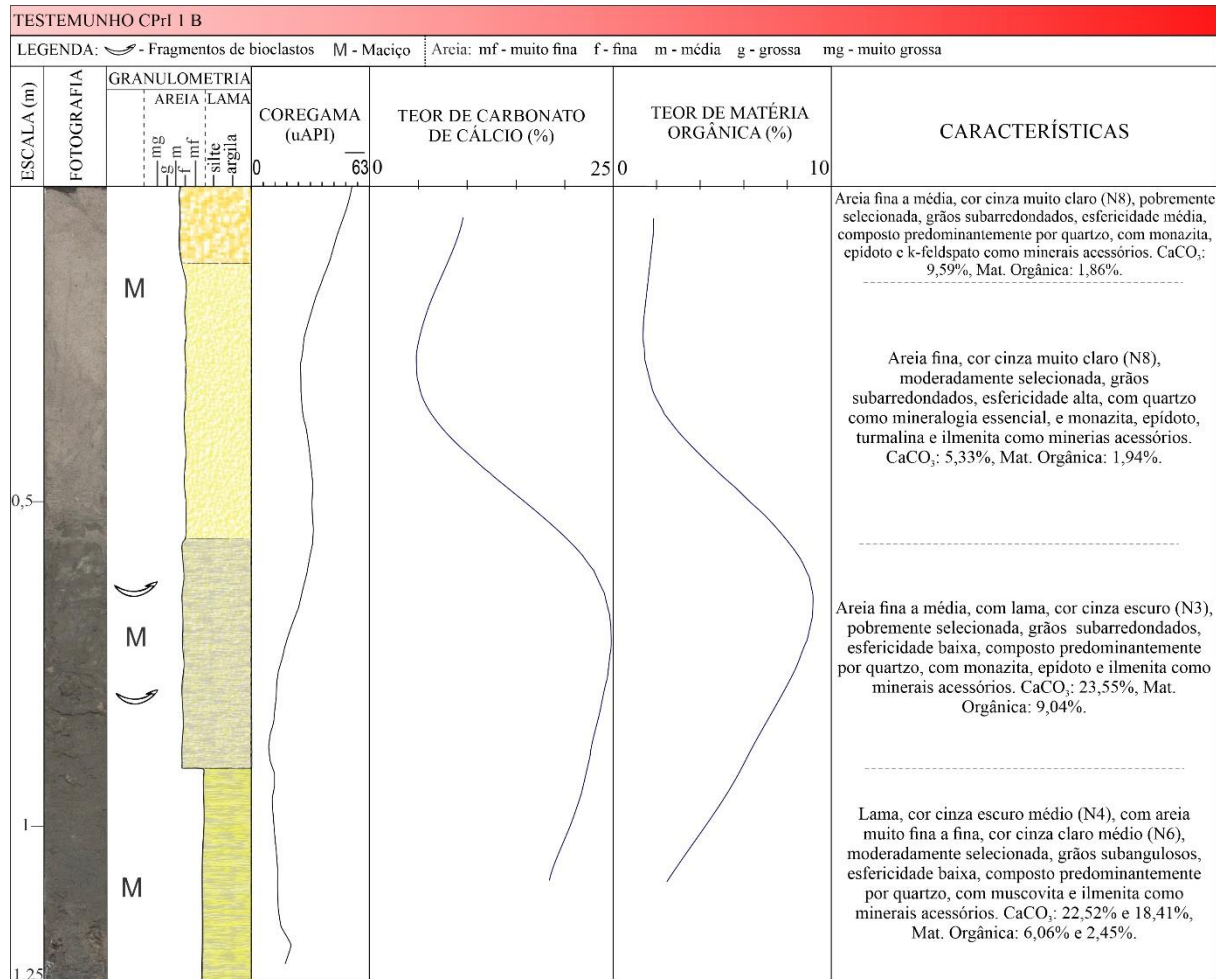


Figura 40: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CPrI1 B, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

Os testemunhos CPrI2 foram retirados na ilha barreira Corta Cachorro, a oeste dos testemunhos CPrI1, também na margem voltada para o oceano. Os sedimentos descritos nesses testemunhos apresentaram granulometria variando de areia muito fina a areia grossa, bem a pobremente selecionada, com quantidades significativas de bioclastos principalmente nas porções mais superiores (alcançando 20% no testemunho CPrI2 C). Na base são encontrados sedimentos mais finos por vezes intercalado com areia média, o que indica uma alternância da energia deposicional; nas porções intermediárias passa a areia fina e em direção ao topo, em torno de 15 cm, há uma porção com sedimentos mais grossos. Os teores de carbonato de cálcio e matéria orgânica apresentaram um perfil inverso, nos intervalos onde os teores de carbonato

apresentavam os maiores valores, os teores de matéria orgânica eram os mais baixos e vice-versa (Figura 41).

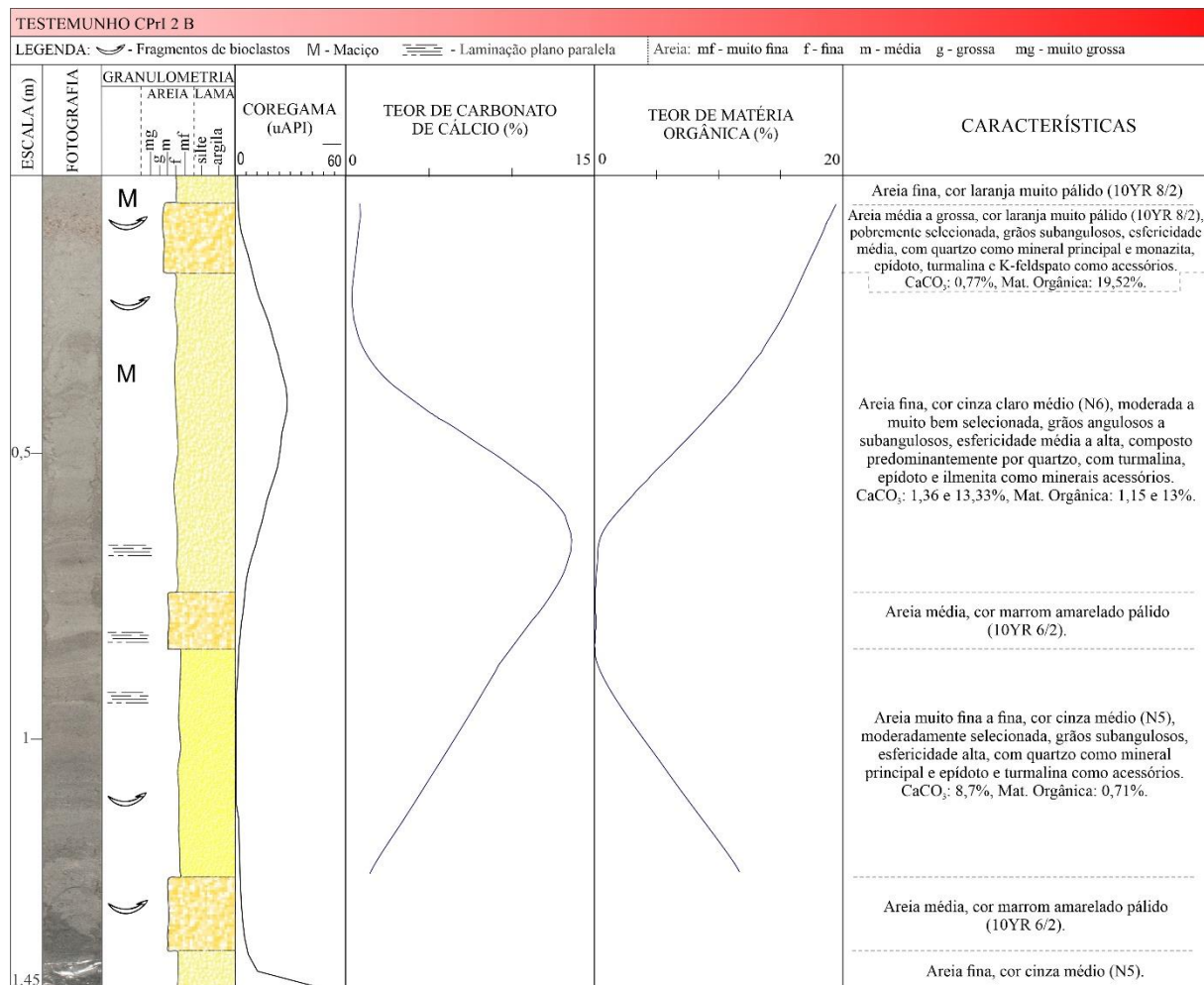


Figura 41: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CPr12 B, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

Os testemunhos CPr13 são os que se apresentaram mais diferentes dos demais, eles foram posicionados na retaguarda da ilha barreira Corta Cachorro, na margem voltada para o rio Casqueira. De maneira geral apresentaram areia média a grossa de coloração laranja acinzentado na base e porções intermediárias, gradando para areia fina de cor cinza amarelado na porção mais superior do testemunho. A profundidade em que ocorre a mudança de textura entre areia média/grossa para areia fina é variável nos testemunhos. Os teores de carbonato de cálcio foram os menores registrados entre todos os testemunhos, com exceção do teor apresentado na porção basal do testemunho CPr13 C (26,94%), onde se destaca também a presença de uma concha inteira. Esses testemunhos apresentaram um padrão de afinamento textural para o topo (Figura 42).

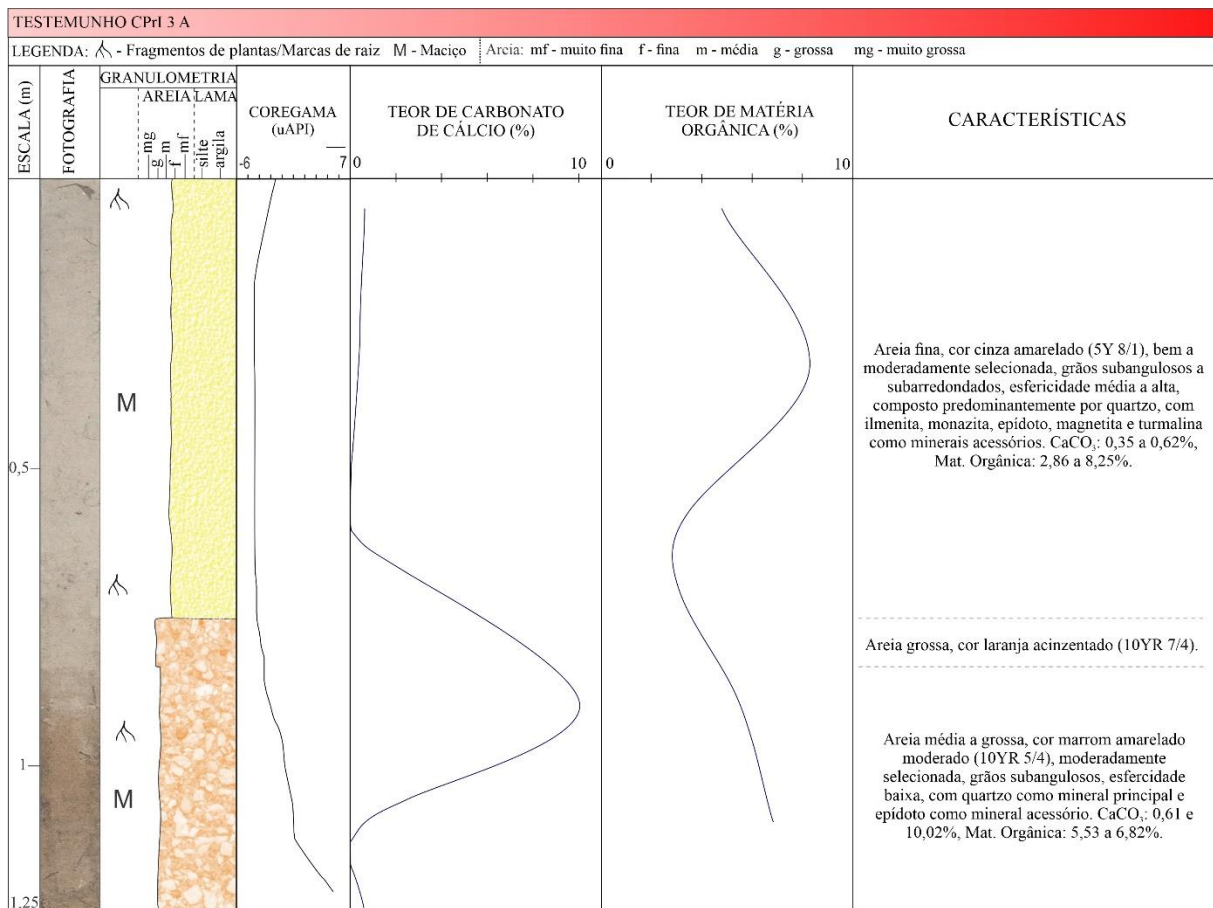


Figura 42: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CPr13 A, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

O ponto de coleta do testemunho SM-6 encontra-se localizado a leste dos testemunhos CPr11, no pontal arenoso Soledade. Esse testemunho de 250 cm, é caracterizado por apresentar em sua porção inferior (250 a 170 cm) sedimentos mais finos (lama e areia muito fina), de coloração castanho escuro, com fragmentos de moluscos e plantas em sua base, caracterizado como pertencentes uma região protegida da ação das marés, interpretada como uma área por trás da ilha barreira, de acordo com Silva (2018). Na sua parte intermediária, entre 170 e 100 cm, apresentou sedimento de granulometria média, de cor cinza com destaque para uma grande quantidade de grãos escuros, interpretados como minerais pesados, dessa forma, a autora mencionada anteriormente atribuiu esse intervalo representante de uma zona de estirâncio. Entre a profundidade de 100 cm até o topo o sedimento é quartzoso, de granulometria fina, com coloração castanho a cinza claro (Figura 43).

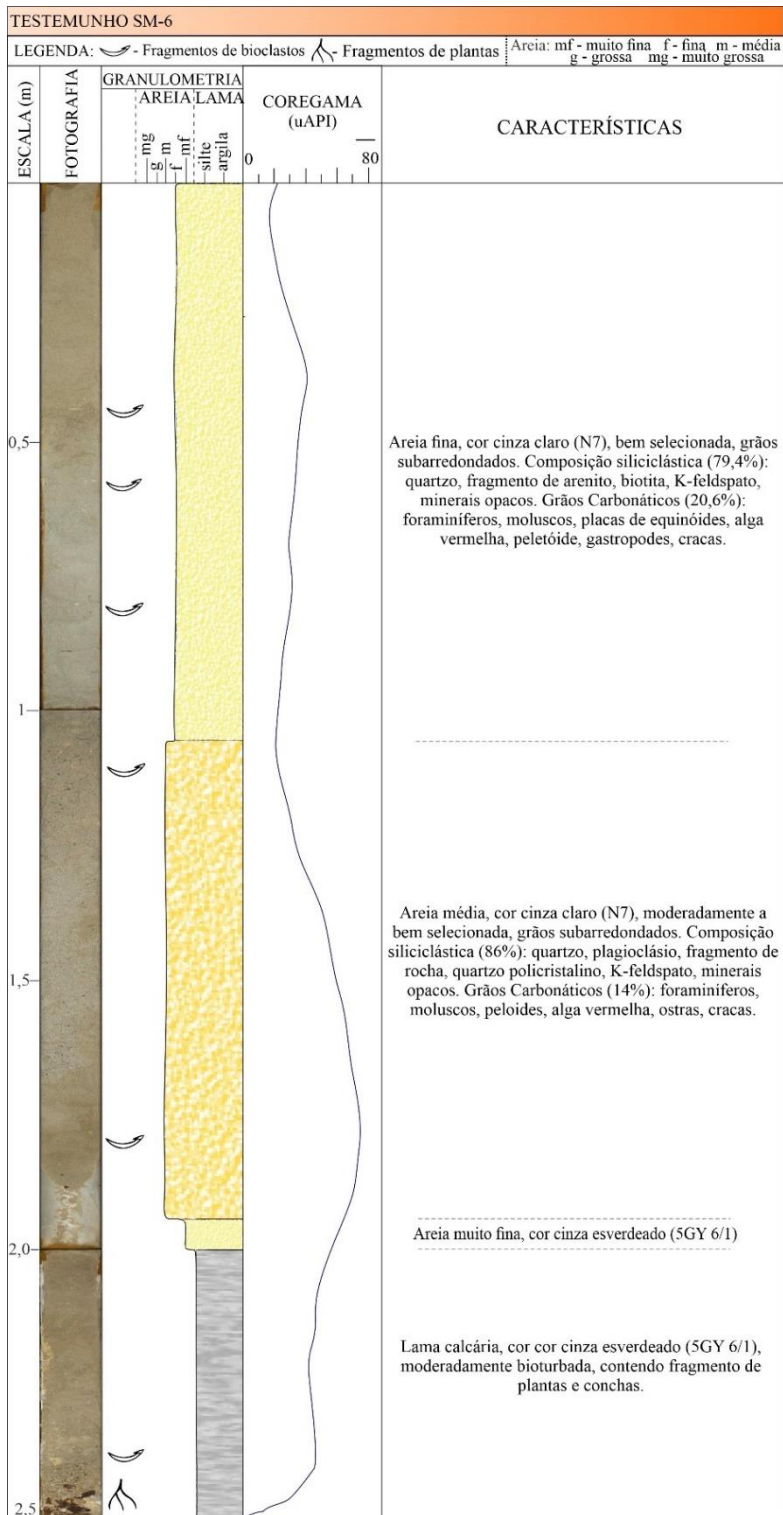


Figura 43: Carta de análise sedimentológica para o testemunho SM-6, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama.

Para os testemunhos recuperados em área de mangue, os testemunhos ARM, coletados na margem de um braço de mar, próximo ao distrito de Diogo Lopes, mostraram um padrão de alternância granulométrica. Da base até aproximadamente 55 cm apresentaram intercalação entre lama e areia fina na maior parte dos testemunhos, evidenciando em alguns uma estrutura plano paralela, por vezes levemente inclinada. Algumas porções com areia média continham quantidade considerável de fragmentos de bioclastos, como por exemplo a base do testemunho

intercalações com média, com estrutura plano paralelo a levemente inclinada, e alguns fragmentos de bioclastos. Nos 30 cm iniciais há um predomínio de areia fina a muito fina intercalada com lama, também com fragmentos de bioclastos. No testemunho CM1 C nos 15 cm iniciais retorna a presença de areia fina e observa-se a presença de matéria orgânica. Os teores de carbonato de cálcio foram maiores na porção superior dos testemunhos, com valores variando de 5,91 a 41,44%, os teores de matéria orgânica apresentaram variação entre 1,22 e 6,01% (Figura 45).

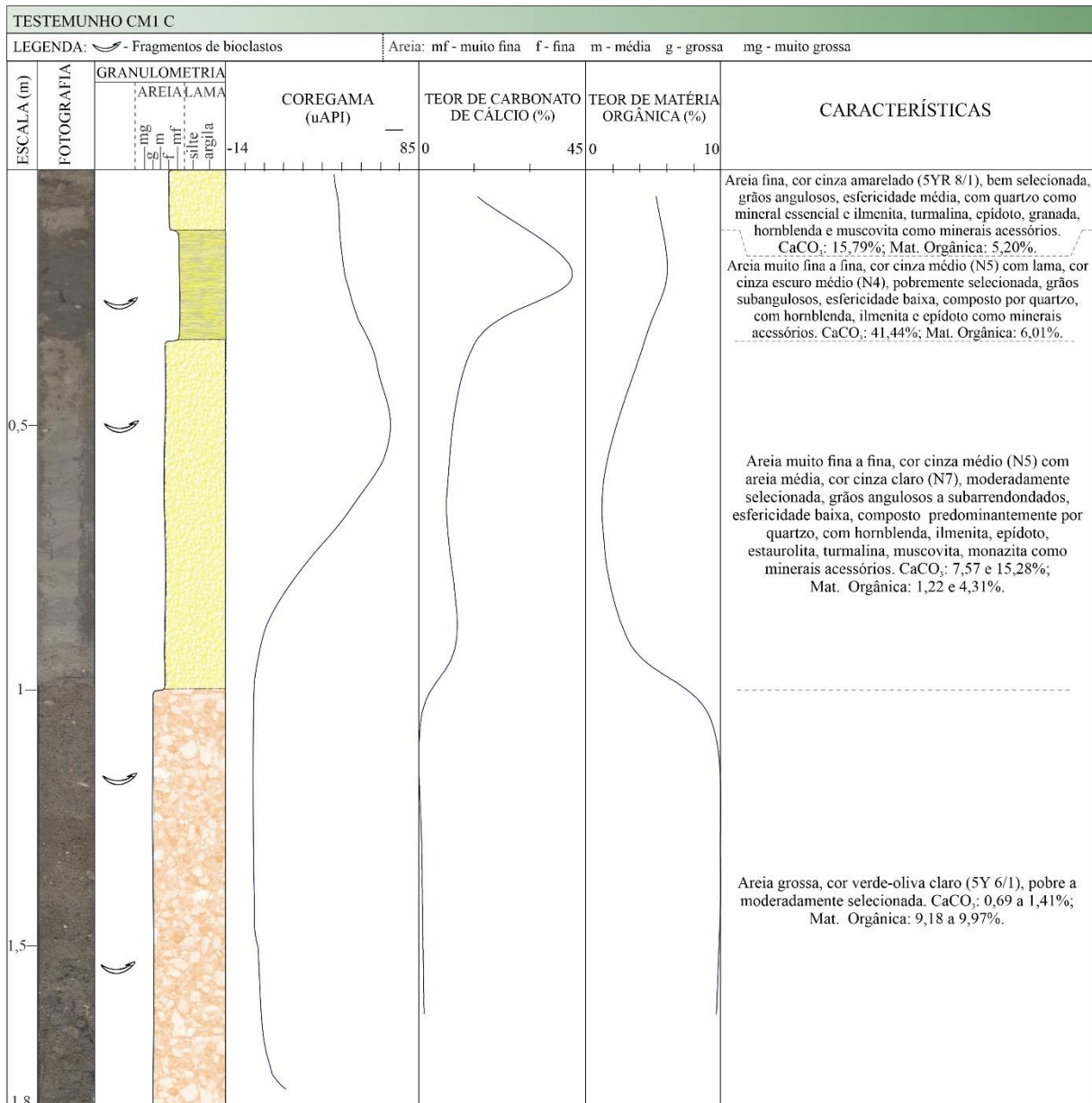


Figura 45: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CM1 C, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

Os testemunhos CM2 foram coletados em um segmento próximo à abertura entre o pontal arenoso Soledade e a ilha barreira Corta Cachorro, na margem do rio Casqueira. O testemunho CM2 A teve uma recuperação maior que os demais, sendo 257 cm de material analisado. De

sua base até cerca de 210 cm apresentou predomínio de areia fina lamosa e alguns fragmentos de bioclastos. Entre 210 e 80 cm observou-se areia muito fina a fina com porções intercaladas com areia média, formando estruturas plano paralelas a inclinadas, há presença de fragmentos de conchas e uma concentração de matéria orgânica em torno de 158 cm de profundidade. A partir de 80 até 35 cm tem-se areia fina a média com alguns fragmentos de conchas. Acima disso foi observado um contato inclinado no qual há mudança na coloração do sedimento, que é caracterizado por lama com intercalação de areia fina, além da presença de pequenos fragmentos de conchas. Os demais testemunhos apresentaram da base até 55 cm areia fina com níveis de areia média a grossa, fragmentos e valvas inteiras de organismo ao longo do intervalo, além da presença também de matéria orgânica em algumas profundidades. Na porção superior, até o topo os testemunhos apresentaram areia muito fina a fina com pequenas porções de lama contendo matéria orgânica e fragmentos de bioclastos. No intervalo inferior do testemunho CM2 A os valores de carbonato de cálcio foram baixo, variando de 1,44 a 4,78%, para todos os testemunhos, os intervalos acima apresentaram valores entre 0,6 e 8,55%, com destaque para uma amostra do testemunho CM2 B em cerca de 62 cm de profundidade que apresentou 36,91% de teor de carbonato. Com relação a matéria orgânica a maioria das amostras apresentou valores em torno de 10 a 27% (Figura 46).

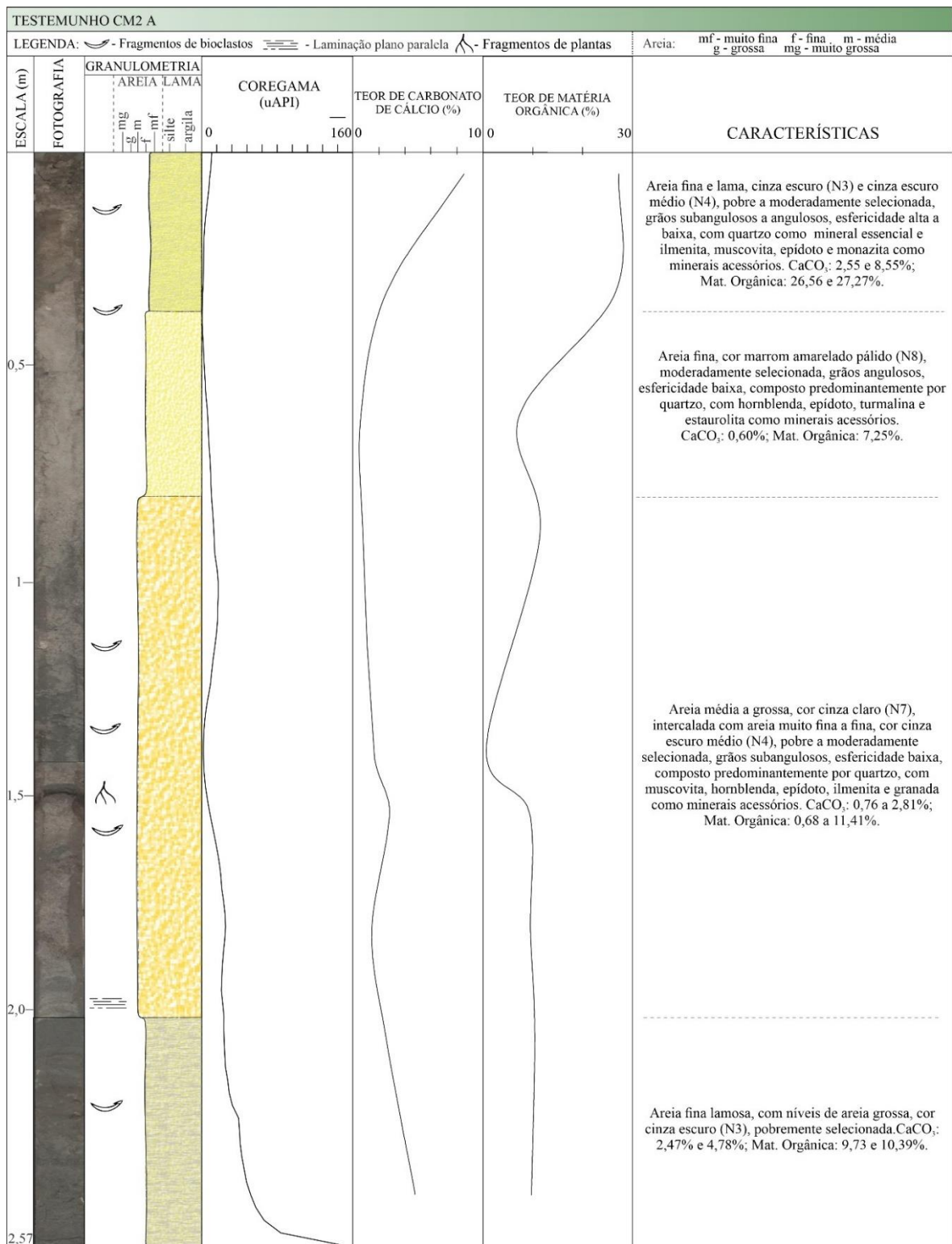


Figura 46: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CM2 A, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

Os testemunhos CM3 foram posicionados em uma região de mangue na retaguarda do pontal arenoso Soledade, na margem do rio Casqueira. Esses testemunhos no geral apresentaram de sua base até 50 cm areia muito fina a fina com intercalações de lama, formando estratificações plano paralelas, além da presença de matéria orgânica e fragmentos de conchas

em algumas profundidades do intervalo. Entre 50 cm e o topo, observou-se um predomínio de areia fina com lama (> 20%), contendo matéria orgânica e fragmentos de bioclastos em torno de todo o intervalo. Os valores dos teores de carbonato de cálcio e matéria orgânica foram altos comparado aos demais testemunhos das áreas de mangue, o teor de carbonato de cálcio em sua maioria foi superior a 30%, sendo o menor valor 9,07 e o maior 41,61%, já o teor de matéria orgânica apresentou valores entre 6,10 e 31,53% (Figura 47).

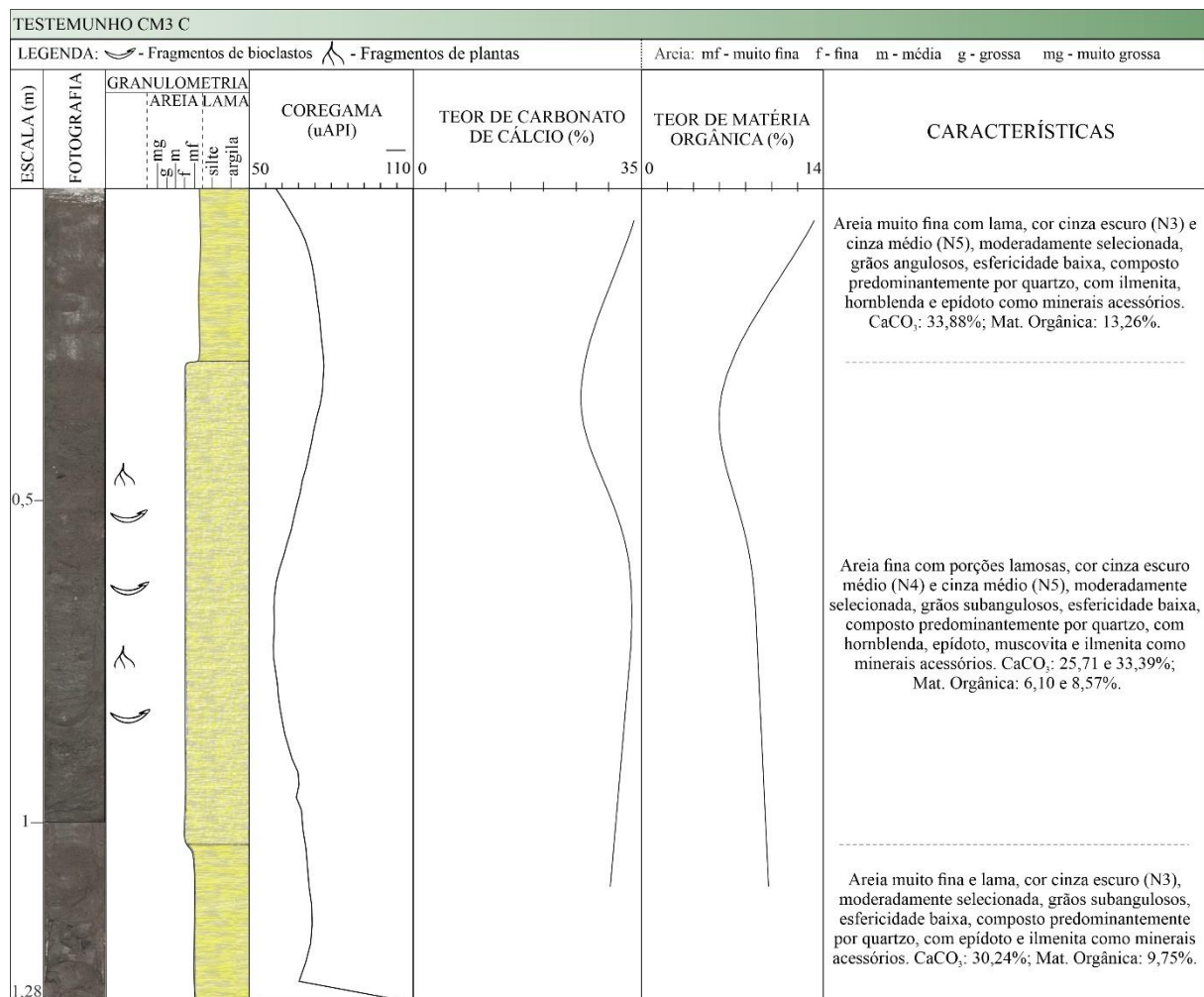


Figura 47: Carta de análise sedimentológica para o testemunho CM3 C, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama, teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica.

O testemunho que foi coletado na porção mais para o interior, em direção ao continente, foi o SM-10, com 292 cm. De sua base até aproximadamente 170 cm é composto por sedimentos finos (lama), com argilominerais, com coloração marrom esverdeado, contendo fragmentos de bioclastos. Em algumas porções desse intervalo forma observadas intercalações de lama com finas camadas de areia, gradualmente passando para o intervalo entre 170 e 50 cm de profundidade, que apresentou sedimentos menos finos que no intervalo anterior, com alguns níveis mais lamosos, coloração marrom acinzentado, destacando a presença de algumas marcas de raízes e fragmentos de bioclastos. O intervalo superior do testemunho, de acordo com Silva

(2018), é marcado pela presença de uma estrutura sedimentar chamada microdiápiro de argila, no contato de um pacote sedimentar abaixo com o intervalo acima. Os sedimentos de granulometria areia fina aparentaram ter uma maior quantidade de quartzo em sua composição, com uma coloração bege esbranquiçado, raros fragmentos de bioclastos, alguns clastos argilosos ressecados, e marcas de oxidação (Figura 48).

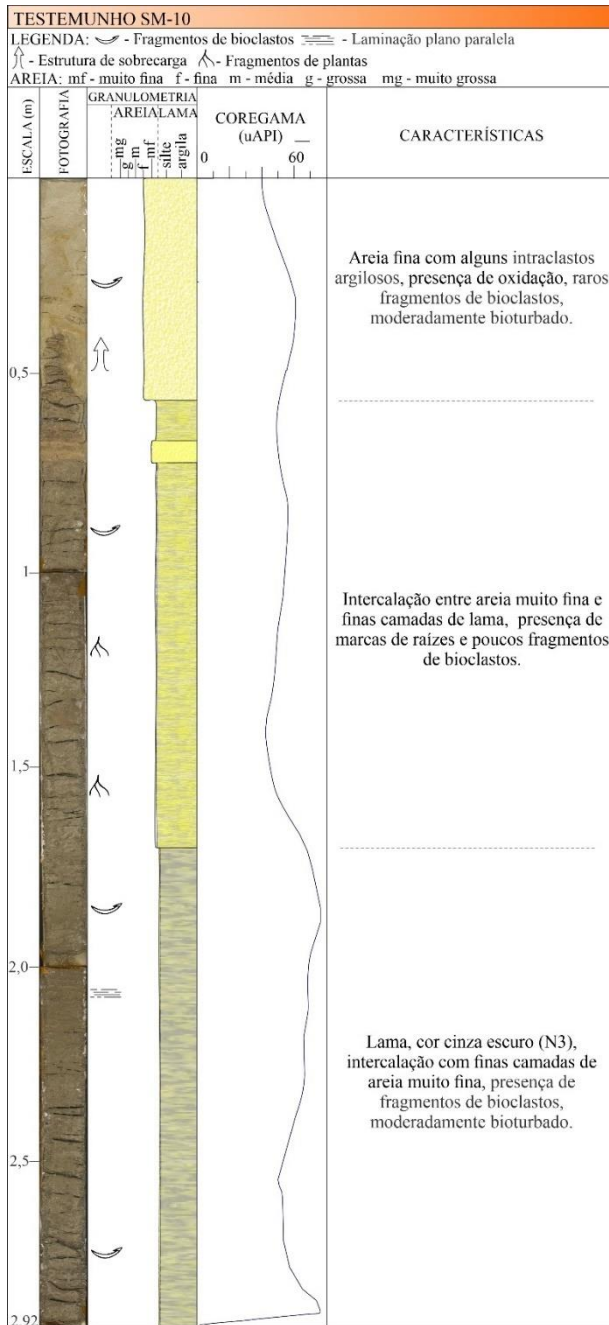


Figura 48: Carta de análise sedimentológica para o testemunho SM-10, mostrando a integração dos dados de testemunhos e perfis coregama.

5.3.1 Associações de Fácies

Analisando as características apresentadas (cor, granulometria, teor de carbonato de cálcio, teor de matéria orgânica, padrão de raios gama) foram identificadas 6 associações de fácies nos sedimentos amostrados nos testemunhos, cada associação está relacionada a subambientes do sistema ilha barreira/pontal arenoso. As associações de fácies reconhecidas incluem sedimentos

representantes de depósitos de canal de maré, planície de maré, margem de canal/barra de pontal, praia/ilha barreira, sobrelavagem e eólico. Suas características e interpretações encontram-se descritas abaixo.

A Associação de Fácies 1 (AF1) é composta predominantemente por sedimentos de granulometria areia grossa, de cor cinza oliva claro/cinza escuro. Sua composição além de quartzo apresenta fragmentos de bioclastos (< 8%), e alguns minerais como hornblenda, ilmenita, epídoto, estauroлита e turmalina. A areia é pobre a moderadamente selecionada, com grãos angulosos, baixa esfericidade. O teor de carbonato de cálcio encontrado variou entre 0,69 e 28,39% e o teor de matéria orgânica entre 9,18 e 10,65%.

Sedimentos com características semelhantes foram encontrados nas amostras coletadas nos canais de maré apresentadas anteriormente, que possuem granulometria variando de areia grossa a média, com grande quantidade de conchas e fragmentos de concha nas porções mais próximas a sua desembocadura, enquanto nas porções mais interiorizadas e próximas às margens, a granulometria é areia média a fina, com algumas conchas e fragmentos de concha, o teor de carbonato de cálcio entre 3,63 e 8,80% (chegando a 20,80% próximo a desembocadura do canal) e o teor de matéria orgânica fica entre 0,16 e 1,3%. De maneira similar, Costa Neto (2009) descreve na região dos canais de maré em Galinhos classes arenosas mais grossas ocorrendo no centro dos canais, segundo o autor, refletindo a alta energia das correntes de maré no centro dos canais, enquanto classes mais finas ocorrem próximas às margens, refletindo a baixa energia das correntes nessas zonas. Dessa forma, foi interpretado que a AF1 está relacionada a depósitos de canais de maré.

A Associação de Fácies 2 (AF2) apresenta areia muito fina a fina, cinza claro amarelado/esverdeado a cinza escuro, intercalada com porções mais lamosas (variando de 8 até 25% da fração silte+argila), e por vezes apresentando níveis mais grossos contendo fragmentos de conchas. Contém matéria orgânica e restos vegetais. O sedimento é pobremente a bem selecionado, com grãos angulosos a subarredondados, esfericidade baixa a alta, composta predominantemente por quartzo e alguns outros minerais como monazita, ilmenita, epídoto, K-feldspato, muscovita, turmalina, hornblenda, estauroлита também presentes (até 5%), também contendo bioclasto (até 18%). Os teores de carbonato de cálcio variam entre 8,60 a 41,61% (contando apenas com um intervalo onde o teor foi menor que 5%), nota-se que nessa fácies os maiores teores de carbonato de cálcio encontram-se relacionados a presença de sedimentos mais finos (maior quantidade de silte). Em contrapartida, os teores de matéria orgânica são mais baixos, em geral inferiores a 15%, estando entre 1,43 e 28,32%.

Características equivalentes foram identificadas nos sedimentos descritos nas amostras de superfície coletadas nas regiões de planície de maré. São caracterizados por apresentarem areia média a muito fina, com uma quantidade de silte associada (entre 5 e 22%), frequentemente encontram-se algumas conchas e fragmentos de concha. O teor de carbonato de cálcio fica entre 2,63 e 19,68%, enquanto o teor de matéria orgânica varia entre 0,26 e 0,85%. Além disso, levando em consideração Bezerra et al. (2009), que caracteriza esse tipo de depósito como constituídos basicamente por areia fina a silte, pobremente selecionados e com alto teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica, essa associação de fácies foi interpretada como pertencente a depósitos de planície de maré. De acordo com Bezerra et al. (2009) esses depósitos ocorrem nas áreas abrigadas da energia da costa por esporões arenosos e ilhas barreiras.

A Associação de Fácies 3 (AF3) é definida pela presença de areia muito fina a grossa, cor cinza claro a cinza escuro, pobremente a moderadamente selecionada, com presença de bioclastos (até 11%), composição predominante de quartzo, com cerca de 5% de outros minerais como hornblenda, epídoto, muscovita, ilmenita, monazita, estauroлита, granada, os grãos são angulosos a subangulosos e possuem uma baixa esfericidade. O teor de carbonato de cálcio varia de 0,60 a 8,55%, enquanto o teor de matéria orgânica apresenta valores um pouco maiores, entre 0,68 e 27,27%. Essa associação de fácies foi interpretada como pertencente a depósitos de barra de pontal do canal de maré. Caldas (2002) descreveu que esses depósitos apresentam na base de areia cinza esverdeada média a grossa que muda gradualmente para cinza escuro esverdeado ou lama preta oliva, bem como Costa Neto (2009) descreveu nas margens de canais do sistema estuarino lagunar de Galinhos e Guamaré a presença de barras em pontais constituídos por areia grossa e areia média.

A Associação de Fácies 4 (AF4) apresenta granulometria variando de areia muito fina a média, de coloração variando de cinza claro a escuro e marrom amarelado, alaranjado, moderadamente a muito bem selecionada, os grãos são agulosos a subarredondados, esfericidade baixa a alta. Apresenta por vezes laminações marcadas pela alternância de cor do sedimento. A composição é predominantemente quartzo, contendo alguns fragmentos de bioclastos (até 20%) e outros minerais terrígenos (máximo de 8%) como monazita, epídoto, turmalina, K-feldspato, ilmenita, estauroлита, muscovita, granada. O teor de carbonato de cálcio nas amostras dessa fácies variou entre 0,71 a 28,39% e o teor de matéria orgânica entre 0,71 e 19,52%.

Essa associação foi relacionada a depósitos de praia/ilha barreira, por apresentarem características semelhantes aos depósitos de praia/ilha barreira descritos a partir dos sedimentos

de superfície apresentados anteriormente, que possuem granulometria composta por areia média a fina, com presença de algumas conchas e fragmentos de conchas, e níveis com material de coloração mais escura, correspondente a intervalos com maior quantidade de minerais pesados, o teor de matéria orgânica variou entre 0,086 e 0,35% e o teor de carbonato de cálcio foi de 2,52 a 3,52%. Bezerra et al. (2009) também descreve esse tipo de depósito, como areias inconsolidadas quartzosas com granulometria variando de fina até muito grossa, sendo rica (> 5%) em bioclastos e, algumas vezes, em minerais pesados. De acordo com Vital et al. (2013) Esses sedimentos são geomorfologicamente relacionados a zona de estirâncio.

A Associação de Fácies 5 (AF5) é representada por areia fina a média, quartzosa (>90% de quartzo), com cerca de 4% de outros minerais (epídoto, monazita K-feldspato, estauroilita, turmalina, magnetita e ilmenita), aproximadamente 10% de fragmentos de bioclastos e presença de restos vegetais. O sedimento possui coloração cinza a marrom amarelado, é moderadamente a bem selecionado, com grãos subangulares a subarredondados, esfericidade média a alta. Baixos teores de carbonato de cálcio foram registrados (0,35 a 1,18%) e teor de matéria orgânica entre 2,86 e 8,25%. Bezerra (2009) define características semelhantes para depósitos eólicos da região, sendo eles constituídos por areia fina a média, com quartzo, predominantemente e, por vezes, fragmentos de conchas, grãos bem selecionados, arredondados a subarredondados e esféricos a subesféricos. Visto isso, a partir dessas características interpretou-se essa associação como sendo pertencente a depósitos de areia eólica.

A Associação de Fácies 6 (AF6) possui areia fina a grossa, de coloração marrom acinzentado alaranjado, pobremente a moderadamente selecionada, de composição predominantemente quartzosa, contendo também minerais como ilmenita, monazita, K-feldspato, epídoto e turmalina, com grãos subangulosos e esfericidade variando de baixa a alta. Também contém fragmentos conchas (<14%) e restos vegetais. O teor de carbonato de cálcio varia entre 0,61 e 10,02% e o teor de matéria orgânica de 5,53 a 6,82%.

Características similares foram descritas em uma amostra coletada na região por trás de uma ilha barreira, na qual destacava a presença de “línguas” de sobrelavagem, com várias conchas e fragmentos de concha associados. A amostra é composta predominantemente por areia média, com areia grossa e fina subordinada. O teor de carbonato de cálcio foi de 7,35% e o de matéria orgânica foi de 0,11%. De acordo com descrições desse tipo de depósito realizada por Caldas (2002), estes são formados através da sobrelavagem da barreira de areia, sendo constituído por areia cinza média a grossa moderadamente selecionada, com estrutura sedimentar, quando presente, uma laminação plana paralela mergulhando de 5° a 7° em direção

ao continente. Essas características levaram a interpretar essa associação de fácies como representante de depósito de sobrelavagem.

As amostras de superfície analisadas representativas dos depósitos sedimentares encontrados no sistema de ilhas barreiras apresentaram características semelhantes às fácies descritas para os testemunhos, corroborando a interpretação do ambiente para cada associação de fácies descrita. No entanto, depósitos como de deltas de maré enchente e vazante, descritos entre as amostras de superfície não foram identificados nos testemunhos. Isso ocorrer pelo fato desses deltas constituírem depósitos efêmeros, sofrendo modificações constantes na sua forma em função da variação das correntes de maré, sendo construídos e retrabalhados em um curto espaço de tempo. De acordo com Mulhern et al. (2021) durante a movimentação oblíqua de uma ilha barreira, os sedimentos temporariamente localizados na entrada dos canais, como barras e deltas de maré enchente e vazante, são erodidos e depositados em uma combinação de preenchimento da entrada dominado pelo *shoreface* e depósitos de *shoreface* da ilha barreira. Dessa forma, esses depósitos podem não ficar registrado no pacote sedimentar.

5.4 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO

A modificação e a evolução das ilhas barreiras modernas ocorrem desde o início do Holoceno. Nesses sistemas atuam uma combinação de processos de transporte através da costa, com deposição e erosão de sedimentos, que levam a preenchimento e abertura de canais.

Esses sistemas são classificados em modelos estratigráficos generalizados com base na resposta da linha de costa (transgressivos, regressivos e agradacionais). Ao longo da história geológica um sistema de ilha barreira pode apresentar períodos de mais de uma dessas classificações dependendo da interação dos mecanismos das forçantes. De acordo com McBride (2013), as mudanças de curto prazo no registro sedimentar são registradas em uma história mais longa da dinâmica da ilha barreira através da estratigrafia da região.

No que se refere ao litoral setentrional do RN, as ilhas barreiras/pontais arenosos e os canais de maré, que se desenvolvem em sua retaguarda, se apresentam como um sistema altamente dinâmico, no qual em uma escala decadal é possível observar a evolução das feições, de ilha barreira para pontal arenoso e vice-versa, devido a aberturas e fechamentos de canais de maré.

Os testemunhos estudados representam a evolução do sistema de ilhas barreiras registrando essas mudanças de curto prazo no registro sedimentar. Dependendo da sua localização dentro do sistema de ilhas barreiras e canais de maré os testemunhos apresentaram sequências distintas, com diferentes fácies preservadas baseada nos processos atuantes naquele momento da história da sua evolução.

A maioria dos testemunhos analisados apresentaram uma limitação no seu tamanho, tendo em geral menos de 2 metros de profundidade, o que pode indicar que o registro analisado é uma parte muito recente da história desse ambiente.

Fazendo uma análise dos testemunhos localizados no segmento do sistema voltado para o oceano, tem-se os testemunhos ARPrI e CPrI 1 que apresentaram em sua base a associação de fácies AF2, representativa de depósitos de planície de maré, e acima dela, a associação AF4, relacionada a depósitos de praia/ilha barreira. A presença da AF2 na base dos testemunhos indica que durante um momento da evolução a região encontrava-se por trás da ilha barreira/pontal arenoso, protegida da ação do mar aberto e posteriormente foi exposta, proporcionando a deposição da AF4 (Figura 49).

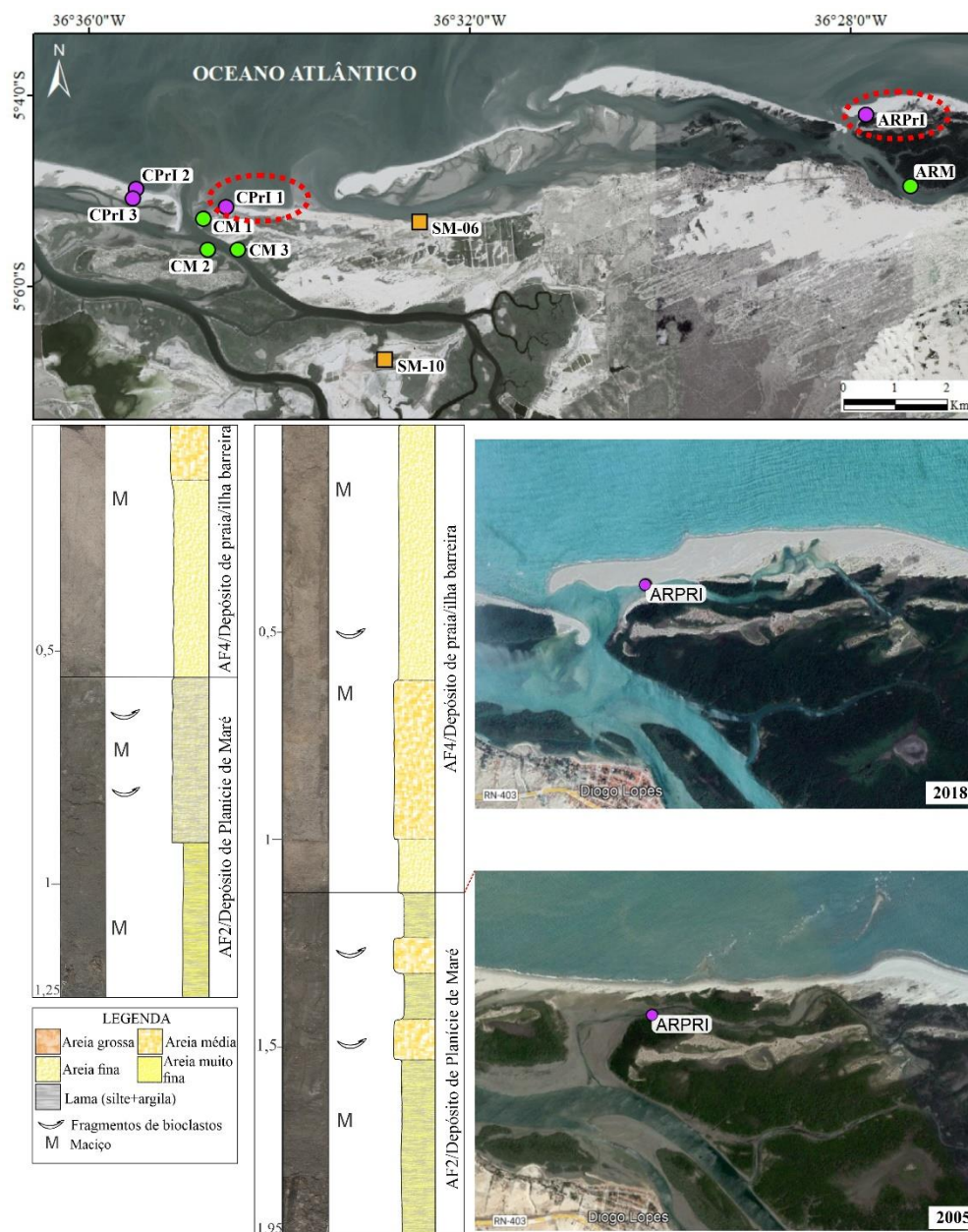


Figura 49: Evolução dos testemunhos ARPrI e CPrI 1, com a presença de depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos de ilha barreira/pontal arenoso.

Nos testemunhos CPrI 2, localizados na ilha barreira Corta Cachorro, a oeste dos testemunhos ARPrI e CPrI 1, foi identificada apenas a associação de fácies AF4, sendo possível associar que no intervalo recuperado a deposição dos sedimentos ocorreu na zona de estirâncio do sistema praia/ilha barreira (Figura 50).

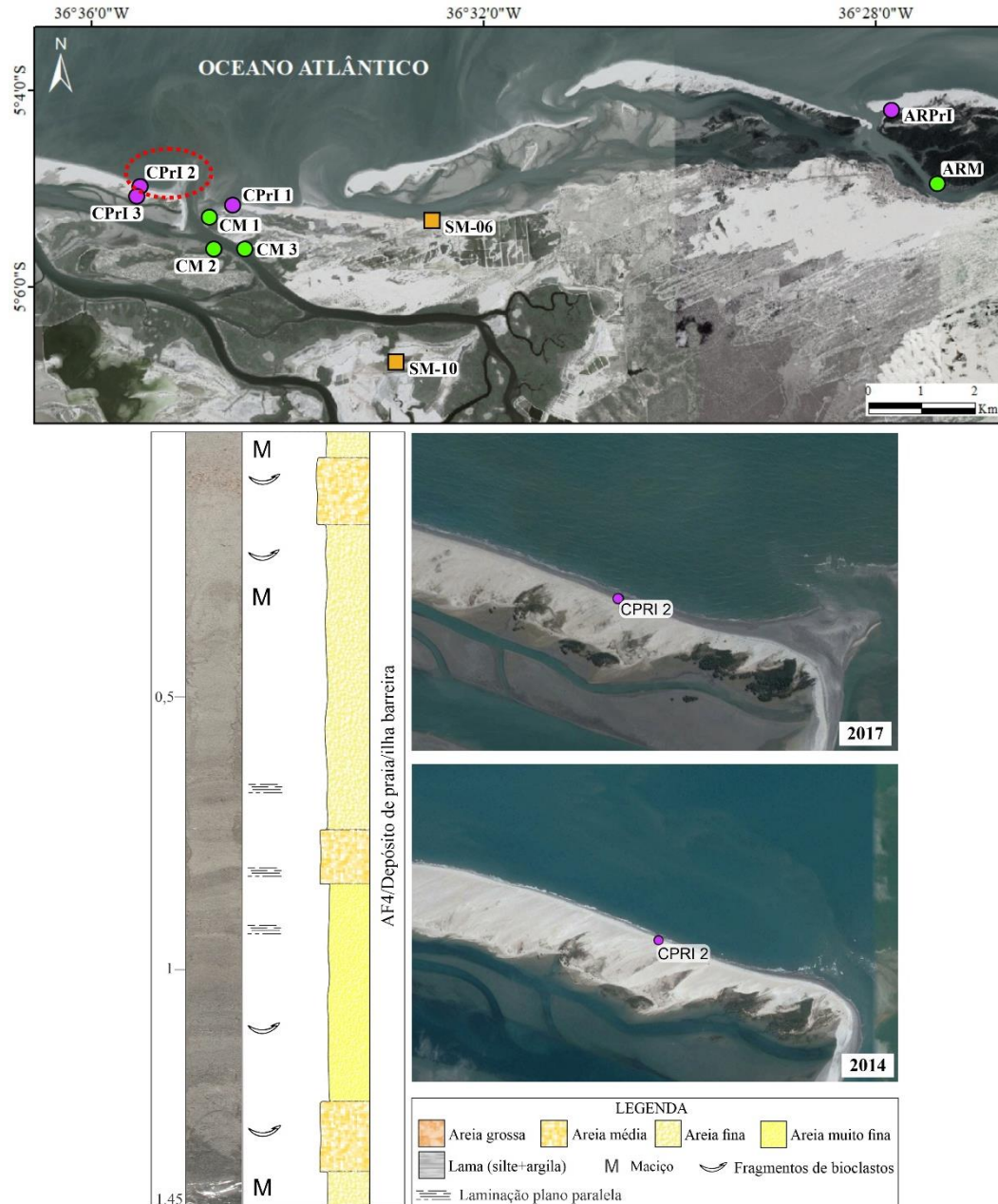


Figura 50: Evolução dos testemunhos CPrI 2, apenas com depósito de ilha barreira/pontal arenoso preservado.

Os testemunhos CM1 localizam-se na margem do pontal arenoso Soledade, próximo a abertura do Canal do Arrombado. Esses testemunhos conseguem trazer o registro de diferentes fases do ambiente de ilha barreira, apresentando a intensa dinâmica a qual está submetido o local. Os sedimentos descritos em sua base indicam que inicialmente naquele ponto havia um canal de maré, onde ocorreu a deposição da AF1. Em seguida desenvolveu-se uma fase na qual

esse local passa a ter uma influência direta das condições oceânicas, ficando exposto a energia das ondas com a abertura de uma entrada para um canal de maré, depositando os sedimentos da AF4, representativa de um ambiente de praia. E por fim, no topo apresenta sedimentos de granulometria mais fina, possivelmente depositados numa região mais protegida, com sedimentos mais finos, em um ambiente de mais baixa energia, com algumas variações nas proporções lama e areia, relacionado a associação de fácies AF2 (Figura 51).

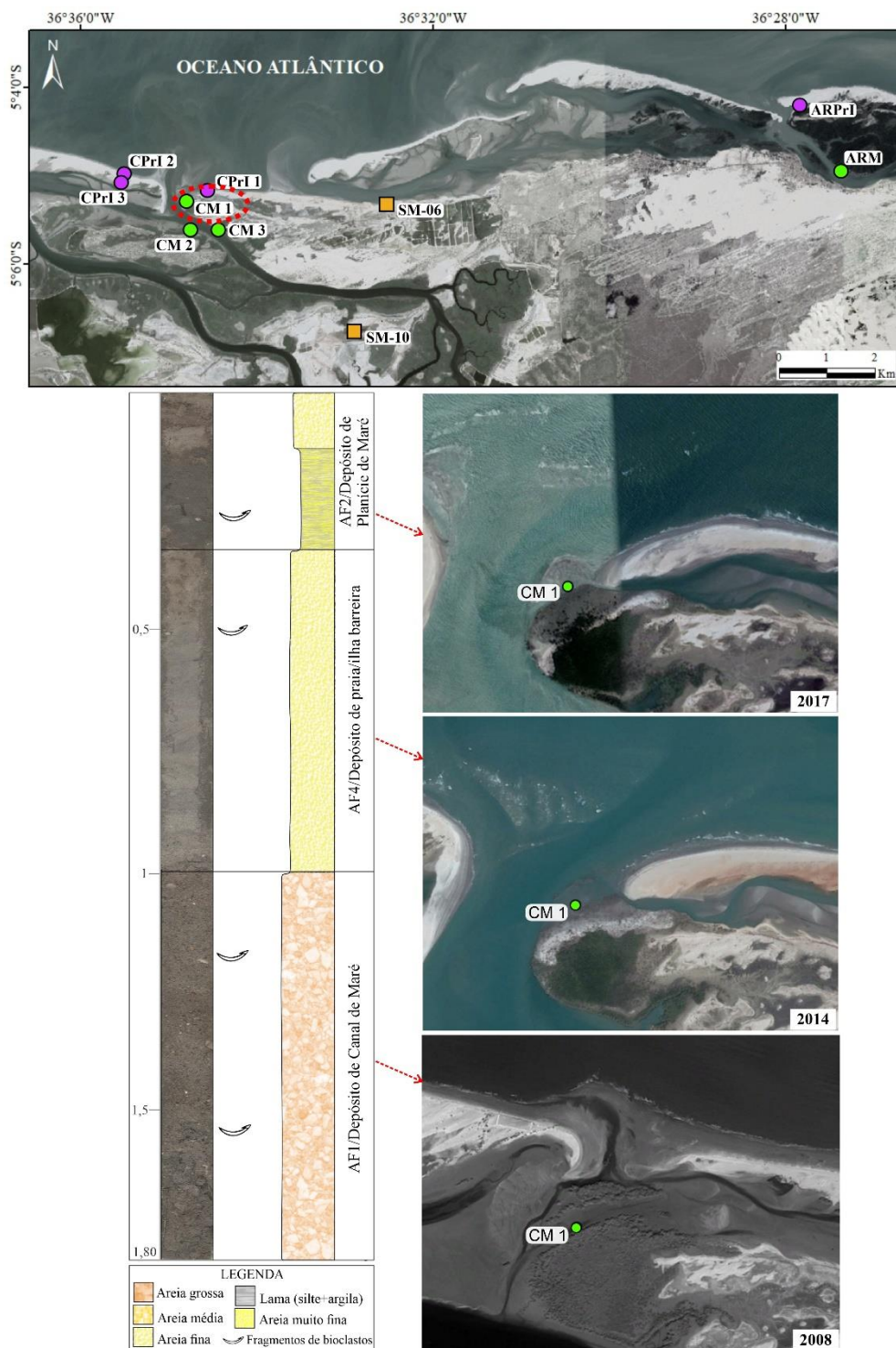


Figura 51: Evolução dos testemunhos CM 1, com a presença de depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos de ilha barreira/pontal arenoso e no topo depósitos de uma região mais protegida.

Na região é comum essa variação de feições ao longo do tempo, com a transformação de ilhas barreiras em pontais arenosos e vice-versa, a partir da abertura e fechamento de canais de maré. Tem-se o registro de uma abertura natural de um canal de maré (Canal Barra do Fernandez), de acordo com Vital et al. (2008), no ano de 1977, no sistema barreira da RDSPT, que passou a ser constituído por um pontal e uma ilha barreira, denominada ilha da Ponta do Tubarão. Um outro exemplo recente dessa dinâmica é a abertura do Canal do Arrombado, em 2006, que seccionou o esporão das praias de Soledade e Corta Cachorro, fazendo dessa essa última numa ilha barreira (Souto 2009). Outro exemplo, no mesmo ano, ocorreu no canal de maré denominado Barra Nova, que seccionou o pontal arenoso que unia Fernandez e Minhoto por um período de aproximadamente um ano e meio. Após esse período, segundo Vital et al. (2008), as condições hidrodinâmicas juntamente com o suprimento sedimentar causaram o fechamento do canal, reincorporando a ilha ao pontal arenoso.

Em um contexto diferente, tem-se a presença de testemunhos localizados na retaguarda do sistema ilhas barreiras/pontais arenosos. Localizado na retaguarda da ilha barreira Corta Cachorro, tem-se o testemunho CPrI3, no qual foram identificadas as associações AF6, na base, que está relacionada a depósito de sobrelavagem, e sedimentos de depósito de areia eólica da AF5 no topo. Assim temos o registro do desenvolvimento de depósitos provenientes do transporte de água e sedimentos da praia sobre as ilhas barreiras/pontais arenosos, pela ação das ondas de maior energia, e posterior deposição atrás desse sistema de barreiras, sobreposto pela deposição de areia transportada por processos eólicos (Figura 52).

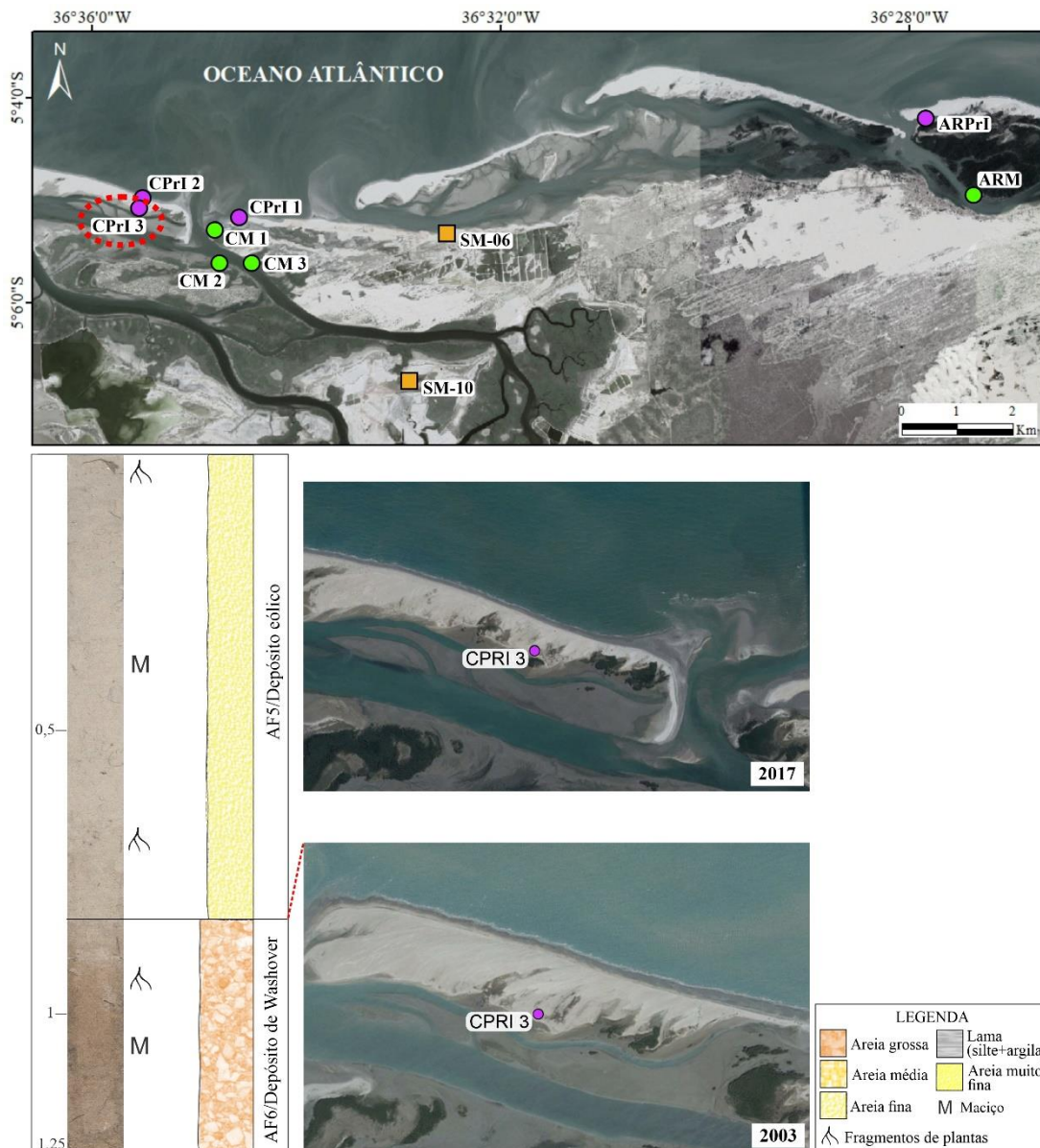


Figura 52: Evolução dos testemunhos CPRI 3, com a presença de depósitos de sobrelavagem na base, sobreposto por depósitos de areia eólica.

Os testemunhos CM2, localizados na margem do canal de maré Casqueira, em frente à abertura do Canal do Arrombado, tem em sua base a associação AF2, de depósitos de planície de maré, sobreposto por sedimentos da AF3, pertencente a depósitos de barra de pontal do canal de maré, cujo contato é bem marcado pela mudança de coloração e granulometria predominante. Essa sequência registrada nesses testemunhos indica que em um momento inicial a área estava protegida da ação do mar aberto pela ilha barreira/pontal arenoso, proporcionando uma sedimentação mais calma, de menor energia, depositando sedimentos mais finos, em seguida houve um aumento de energia no sistema e propiciou a deposição de sedimentos de maior granulometria, que são os sedimentos arenosos da associação AF3 (Figura 53).

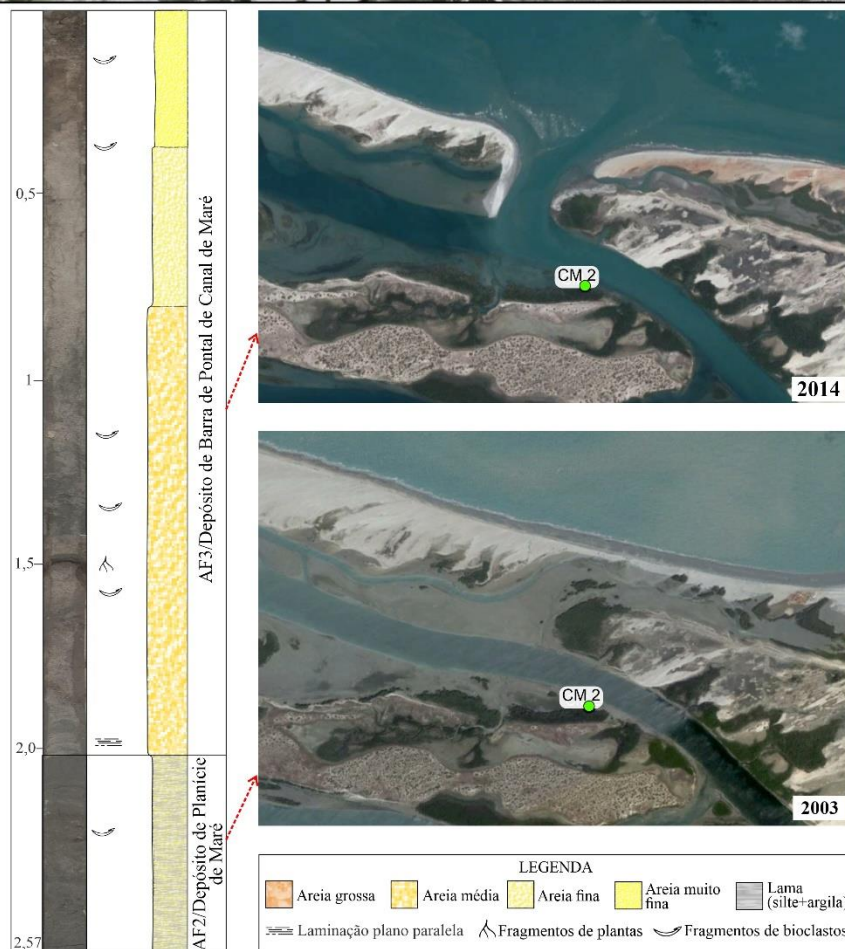


Figura 53: Evolução dos testemunhos CM 2, com a presença de depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos arenoso de barra de pontal de canal de maré.

Os testemunhos ARM e CM3 que se encontram localizados na porção mais interna dos canais de maré apresentaram uma sedimentação mais homogênea e contínua com representação de uma única associação de fácies, AF2, representativa de depósitos de planície de maré/mangue (Figura 54). Nesses testemunhos observa-se uma predominância de sedimentação arenosa, porém alguns níveis mais lamosos são reconhecidos, isso pode estar relacionado a energia do sistema, que atua na dinâmica de transporte de deposição. Eventos de variação do fluxo das marés nos canais, com consequente variação de energias ao longo de

diferentes estágios, colaboram com cada processo de deposição, dessa forma, a fases de maior energia, promovem uma sedimentação mais arenosa, enquanto em uma menor energia, há o predomínio de sedimentação lamosa.

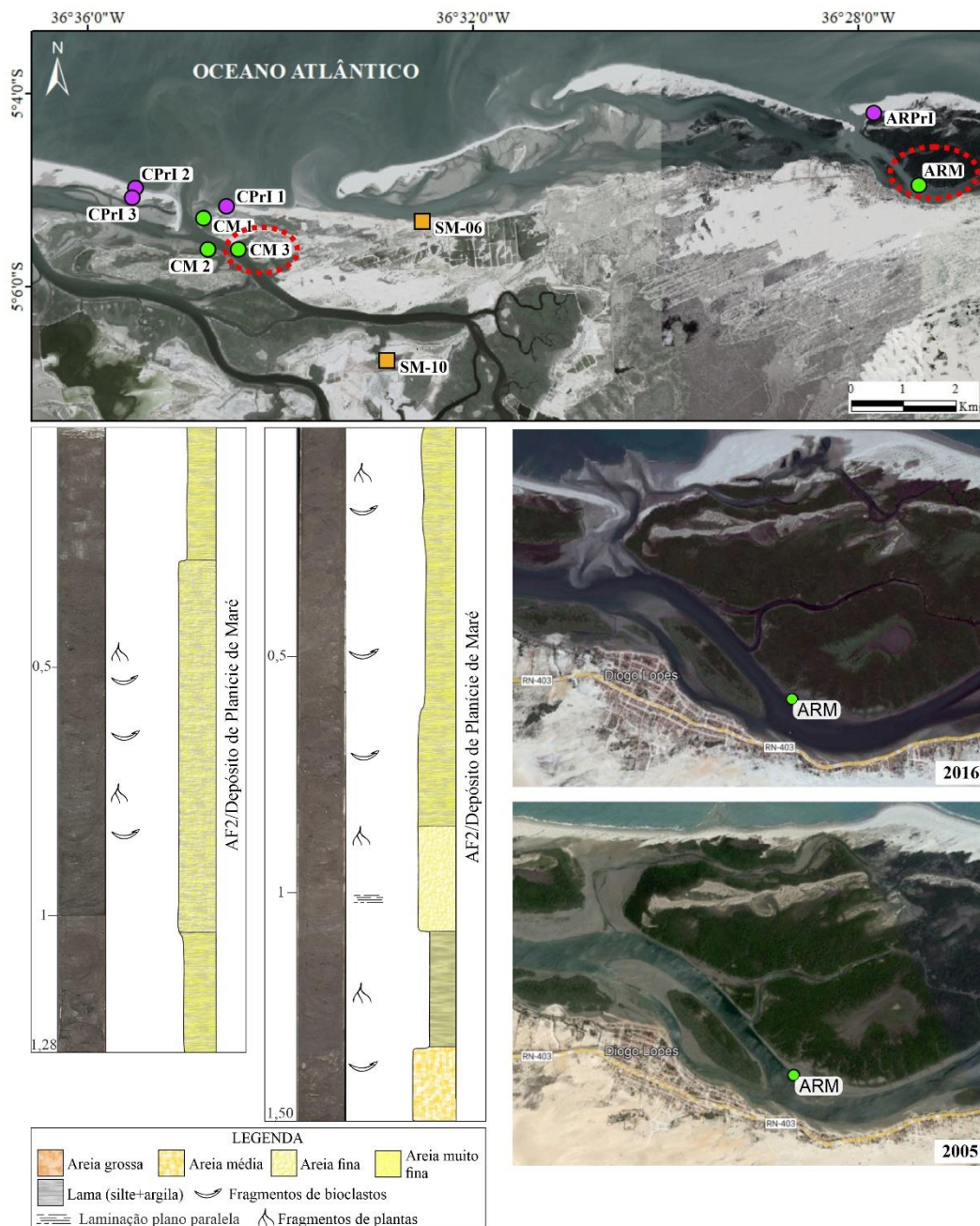


Figura 54: Evolução dos testemunhos ARM e CM3, com a preservação apenas de depósitos de planície de maré.

De acordo com estudos de Silva (2019), as barreiras do litoral setentrional do Rio Grande do Norte se caracterizam como feições costeiras altamente dinâmicas, que sofrem episódios contínuos e intercalados de expansão e retração. Dessa forma, é importante que o comportamento evolutivo seja descrito em curtos intervalos de tempo para evitar erros de interpretação. A exemplo desse caráter efêmero e mutável do ambiente, tem-se uma análise,

realizada por Silva & Vital (2019), entre 1961 e 2018 do sistema Tubarão/Fernandez, apresentando um ciclo evolutivo (Figura 55).

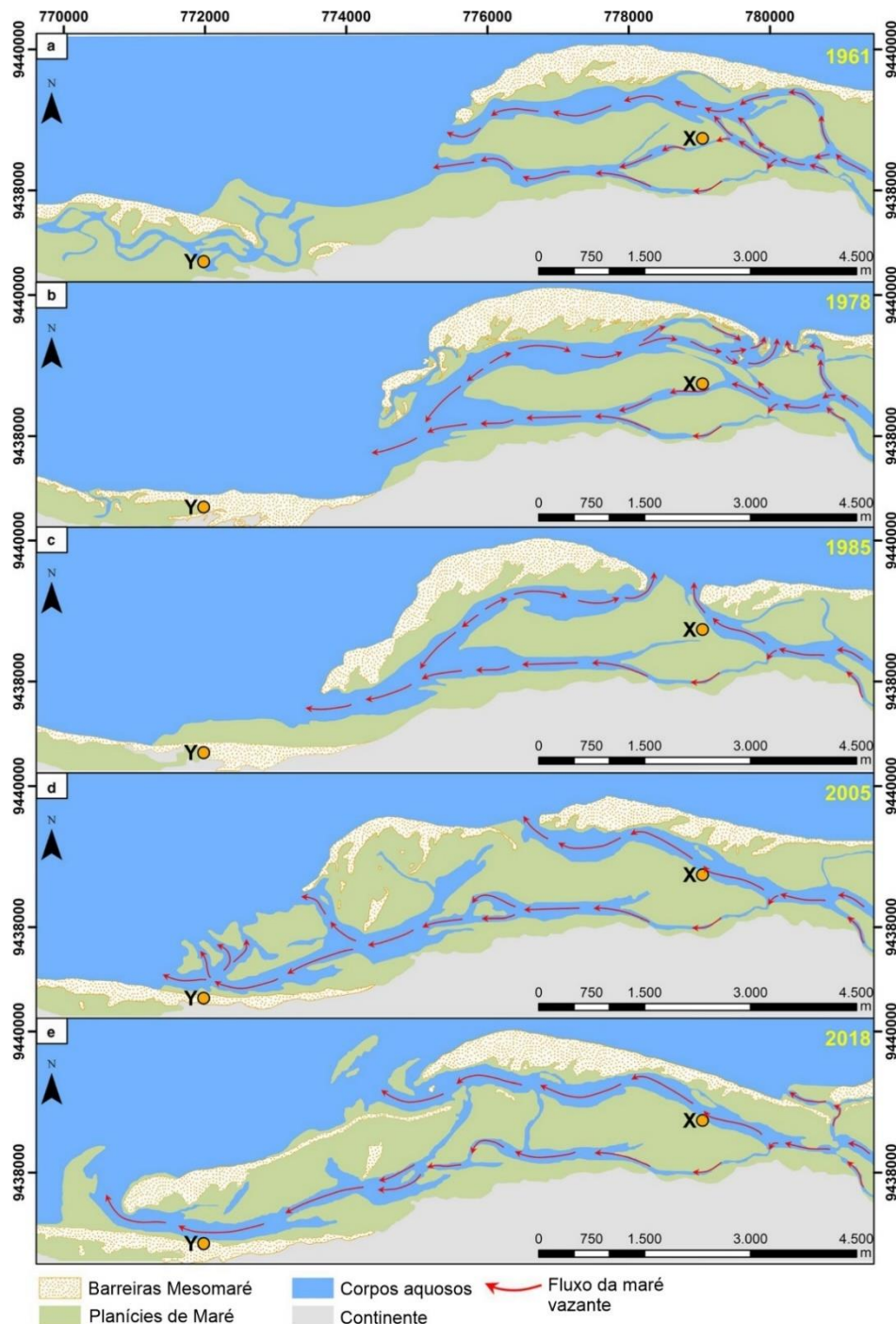


Figura 55: Evolução entre os anos de 1961 e 2018 do sistema Tubarão/Fernandez mostrando as mudanças que ocorrem no sistema de ilhas barreiras/pontais arenosos e canais de maré. Fonte: Silva e Vital (2019).

Nesse ciclo é possível observar abertura e fechamento de canais, surgimento e desaparecimento de feições arenosas, que vão implicar na configuração da sequência vertical desse ambiente, como exemplificado nos testemunhos estudados, com o desenvolvimento um empilhamento com características de cada momento dessa evolução (registros do período em

que determinado ponto estava submetido a uma condição de planície de maré e foi posteriormente exposto a ação de ondas e correntes litorâneas, por exemplo).

Testemunhos descritos no trabalho de Silva (1991) e detalhados por Silva (2018) que estão em regiões atualmente mais afastados da costa, mas que no passado poderiam estar em uma posição e dinâmica semelhante ao que se observa nos testemunhos atuais foram utilizados para comparação.

O testemunho SM-6, no pontal arenoso Soledade, a leste dos testemunhos CPrI1, é caracterizado na sua porção inferior por sedimentos mais finos (areia muito fina e lama), caracterizado como pertencentes uma região protegida da ação das marés, interpretada como uma área por trás da ilha barreira, relacionada a associação AF2. Na sua parte intermediária e superior, os sedimentos foram correlacionados a depósitos de praia, pertencendo a AF4.

Observa-se uma correspondência nas características apresentadas pelo testemunho SM-6, de Silva (1991), com testemunhos ARPrI e CPrI 1 (Figura 56), é possível observar o desenvolvimento de sequencias verticais semelhantes, com depósitos de sedimentos finos, entre a base e a porção intermediária, caracterizados por estarem dispostos em uma região protegida, de planície de maré (AF2). Enquanto na superior tem-se sedimentos de granulometria areia média a fina, característicos de depósitos de praia/ilha barreira (AF4).

O testemunho SM-10, localizado em uma porção de terra mais interiorizada atualmente, e de acordo com Silva (1991), foi retirado próximo a um canal secundário formado pelo rompimento do canal principal do Rio da Conceição. Apresenta no intervalo inferior e intermediário sedimentos finos com fragmentos de bioclastos, marcas de raízes, interpretado como pertencente a associação de fácies AF2, relacionadas a depósito de planície de maré. E no intervalo superior tem-se a presença de sedimentos interpretados como pertencentes a depósitos de barra de pontal do canal de maré (AF3).

O testemunho SM-10, assim como os testemunhos CM e ARM, apresenta porções representantes de depósitos de Planície de Maré (AF2), com sedimentos finos, presença de matéria orgânica, fragmentos de bioclastos. E semelhante ao CM2, apresenta um intervalo superior com sedimentos mais arenosos, inseridos na AF3, pertencente a depósitos de barra de pontal do canal de maré (Figura 57).

Essas semelhanças observadas podem ser um indicativo de que os mesmos processos e eventos que ocasionaram a deposição desses sedimentos acontece de forma semelhante atualmente, gerando sequencias e depósitos parecidos, dessa forma, sendo uma potencial fonte para estudos de reservatórios análogos de óleo e gás.

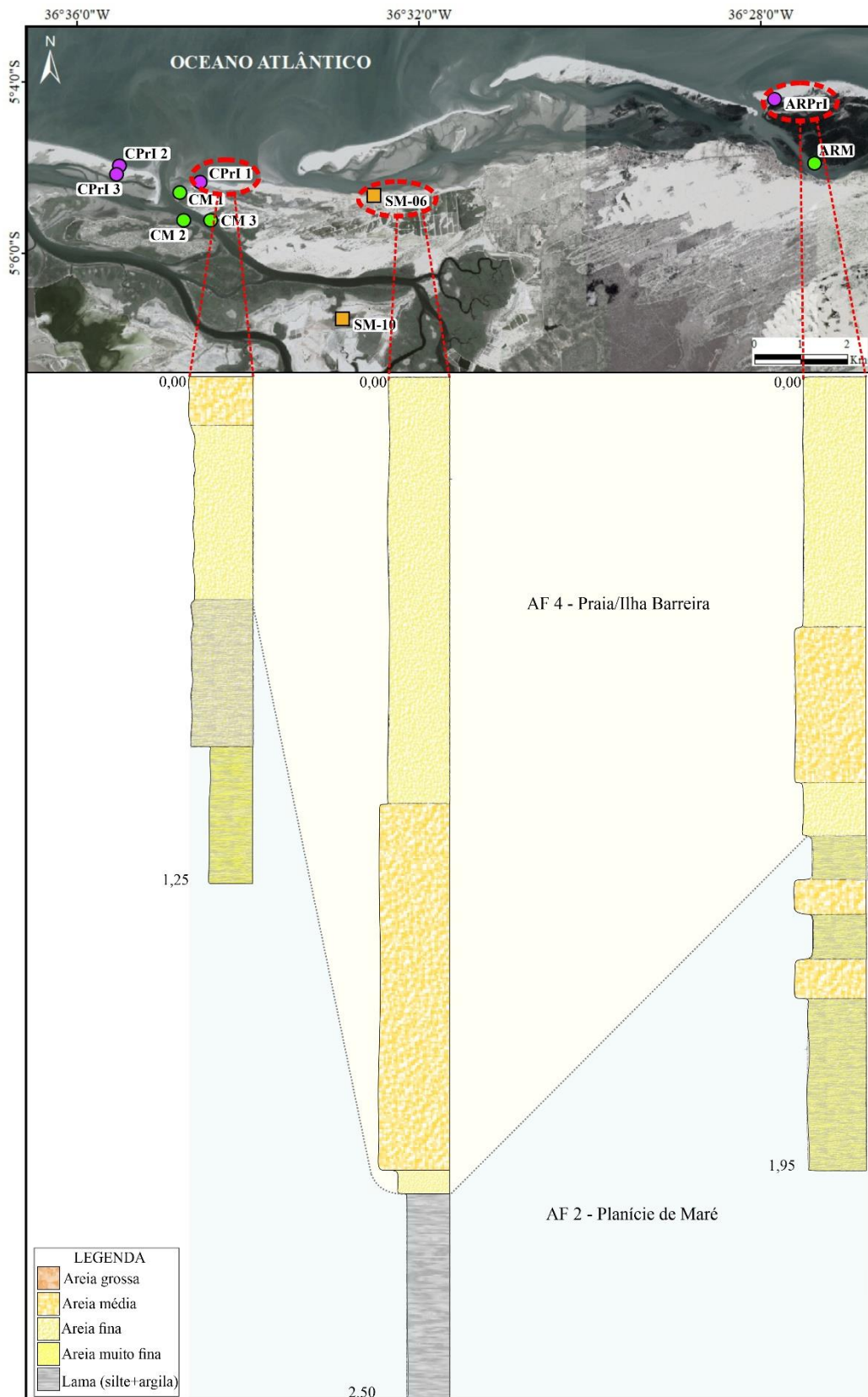


Figura 56: Disposição lateral dos testemunhos CPr1, SM-6 e ARPr1.

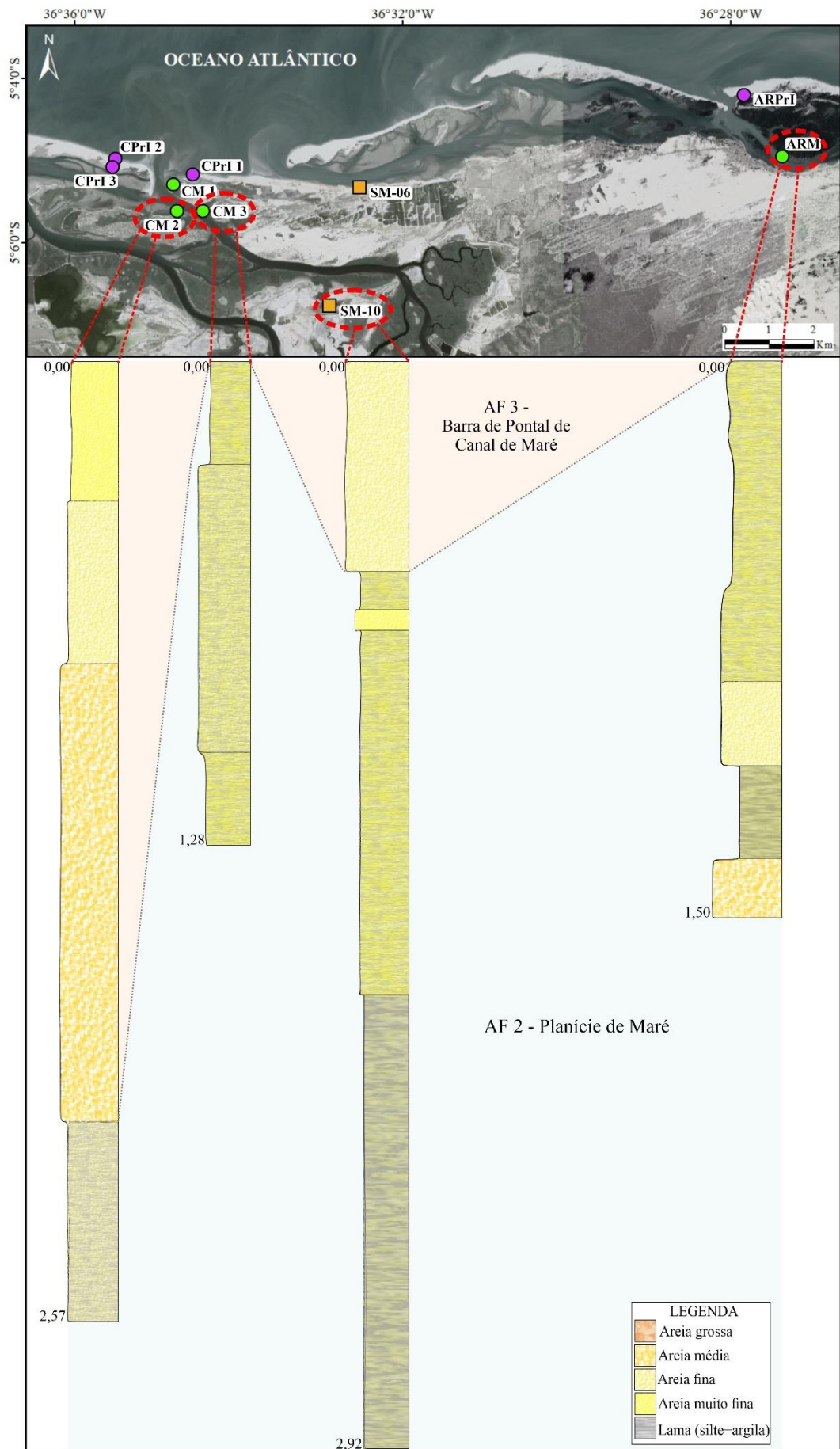


Figura 57: Disposição lateral dos testemunhos CM 2, CM 3, SM-10 e ARM.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar as amostras de superfície que representam os depósitos sedimentares do sistema de ilhas barreiras e observar a semelhança de suas características com as associações de fácies descritas nos testemunhos, foi possível reforçar a interpretação do subambiente associado a cada uma das associações. Os depósitos de delta de maré enchente e vazante, descritos nas amostras de superfície, são construídos e retrabalhados em um curto período, sujeitos a mudanças constantes em sua forma devido às variações das correntes de maré, e possivelmente devido a isso não foram identificados na análise dos testemunhos.

Na batimetria foi possível observar que a profundidade dos canais variou entre 1,3 e -6,3 m. Com relação a morfologia, o formato da calha principal apresentou-se em “U”, sendo identificados bancos areno/lamosos em suas margens, que ficam expostos na superfície durante a maré baixa. Duas regiões com dunas subaquáticas expressivas foram distinguidas: a Área 1, que apresentou dunas de crista sinuosa, com altura média de 0,40 m e espaçamento de 11,53 m, sendo classificadas como dunas 3D pequenas a médias; e a Área 2, com dunas de crista reta a levemente sinuosa, altura média de 0,72 m e espaçamento de 14,91 m, sendo classificadas com dunas 2D a 3D médias a grandes. Ambas as áreas apresentaram índice de ondulação que indica que as dunas foram geradas por corrente, e índice de assimetria que aponta que seus perfis transversais são assimétricos, com fluxo no sentido que corresponde a direção do fluxo da vazante residual, predominante na região.

Os sedimentos das amostras de superfície apresentaram a classificação textural em sua maioria como areia siliciclástica, tendo uma amostra apresentado a classificação lama terrígena e outra areia sisliclástica com grânulos e cascalho. As 6 associações de fácies identificadas nos testemunhos foram atribuídas a depósitos de canais de maré, planície de maré, barra de pontal do canal de maré, praia/ilha barreira, areia eólica e sobrelavagem.

As amostras de superfície, bem como os testemunhos estudados, apresentaram uma elevada relação areia-lama e uma baixa quantidade de argila nos sedimentos, o que indica processos de transporte de alta energia atuando sobre todo o sistema. Essa energia elevada favorece a formação das dunas subaquáticas 2D e 3D que foram identificadas na batimetria realizada nos canais de maré.

No que diz respeito à evolução do sistema de ilhas barreiras e pontais arenosos, é reconhecido que se trata de um sistema altamente dinâmico, no qual em uma escala de décadas, é possível observar a transição das feições, alternando entre ilhas barreiras e pontais arenosos, em decorrência das aberturas e fechamentos dos canais de maré.

Os testemunhos analisados documentam a evolução do sistema de ilhas barreiras, registrando essas variações de curto prazo no registro sedimentar. Conforme a posição dentro do sistema de ilhas barreiras e canais de maré, esses testemunhos exibiram sequências distintas, com diferentes fácies preservadas, refletindo os processos ativos naquele período específico da sua evolução. Por exemplo, sequências que mostram que determinado ponto estava submetido a uma condição de planície de maré e foi posteriormente exposto a ação de ondas e correntes litorâneas.

Além disso, registrou-se correspondências no empilhamento e depósitos apresentados pelos testemunhos descritos por Silva (1991), com testemunhos coletados mais recentemente. As semelhanças observadas sugerem que os processos e eventos que levaram à deposição dos sedimentos continuam ocorrendo de maneira semelhante ainda no presente, resultando em sequências e depósitos similares. Portanto, isso pode servir como uma possível fonte para estudos de reservatórios análogos de óleo e gás.

Por fim, para uma definição mais segura da evolução desse sistema e suas modificações, recomenda-se para estudos futuros a realização de datações e determinação da taxa de sedimentação em testemunhos do sistema de ilhas barreiras/pontais arenosos próximos à Macau/RN. Para tal, pode ser aplicada a técnica AMS ^{14}C , para datação absoluta de sedimentos e o método gamaespectométrico ^{210}Pb , para a taxa de sedimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. L. 2001. Cartografia temporal e análise geoambiental da dinâmica da foz do rio Piranhas-Açu, região de Macau-RN, com base em imagens LANDSAT 5-TM. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 103p.
- ARARIPE, P. T., FEIJÓ, F. J. 1994. Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da Petrobras, 8:127-141.
- ARAUJO, M., VITAL, H., AMARO, V. E., SILVA, M. A. 2004. Caracterização das Forçantes Hidrodinâmicas - Correntes, Ondas e Marés - Na Região Costeira de Guamaré-RN. Proceedings of The II Workshop PETRORISCO, Belém-PA.
- ASHLEY, G.M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Research*, 60:160–172.
- BDIA - Banco de Dados de Informações Ambientais. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao>>.
- BEZERRA, F.H.R., LIMA-FILHO, F.P., AMARAL, R.F., CALDAS, L.H.O., E COSTA NETO, L.X. 1998. Holocene coastal tectonics in NE Brazil, in Stewart, I.S., and Vita-Finzi, C., eds, Coastal tectonics: London, Geological Society, Special Publications, 146:279-293.
- BEZERRA, F. H. R.; BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K. 2003. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte state coast, Brazil. *Marine Geology*, 196:73-89.
- BEZERRA, F.H.R.; AMARAL, R. F.; SILVA, F. O.; SOUSA, M. O. L.; FONSECA, V. P., VIEIRA, M. M. 2009. Programa Geologia do Brasil: Levantamentos Geológicos Básicos, Geologia da Folha Macau. Nota Explicativa da Folha Macau. Folha SB.24-X-D-II, Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:100.000. Brasília: CPRM.
- CALDAS, L. H. O. 2002. Late quaternary coastal evolution of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. PhD Thesis, Institute of Geosciences University Christian Albrechts zu Kiel, Kiel-Germany, 92 p.
- CALDAS, L. H. O., STATTEGGER, K., VITAL, H. 2006. Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Marine Geology*, 28:39-53.
- CASTRO, A. F., AMARO, V. E., SOUTO, M. V. S., GRIGIO, A. M., FREITAS, C. C. M. 2011. Modeling and development of a computational system for evaluation of the coastal dynamics of Macau area, Rio Grande do Norte state, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 64:1648–1652.
- CHAVES, M. S., VITAL, H. 2001. Caracterização Geoambiental dos parâmetros de onda entre o trecho praiado da Ponta do Tubarão e Gamboa do Corta Cachorro. In: VIII Congresso da Associação Brasileira de Geologia do Quaternário-ABEQUA, Imbé. Anais do VIII Congresso da Associação Brasileira de Geologia do Quaternário.
- CHAVES M. S., VITAL H., SILVEIRA I. M. 2006. Beach Morphodynamic of the Serra Oil Field, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39:594–597.

COSTA, B. C. P. 2010. Avaliação ambiental de manguezais adjacentes aos campos petrolíferos de Macau e Serra (RN), como subsídio às medidas mitigadoras ao processo erosivo. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COSTA NETO, L. X. 2009. Caracterização geológica, geomorfológica e oceanográfica do sistema Pisa Sal, Galinhos, RN, NE do Brasil, com ênfase à erosão, ao transporte e à sedimentação. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 270 p.

CRUZ, D. B. L. T. 2022. Padrões estratigráficos holocênicos do Delta do Parnaíba através de testemunhos por vibração. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 61 p.

DAVIS, R.A. JR.; FITZGERALD, D.M. 2004. Beaches and Coasts. Blackwell Science, Oxford.

DELLA FÁVERA, J. C. 2001. Fundamentos de Estratigrafia Moderna. Ed. UERJ, Rio de Janeiro, 264p.

DIAS, J. A. 2004. A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos. Universidade do Algarve, Faro. 84p.

DIAS, G. T. M.; FERRAZ, C. B. 2004. SAG - Sistema de Análise Granulométrica. Manual do Usuário. Publicação interna Dept. Geologia-Lagemar/UFF. Disponível em: <<http://www.igeo.uff.br>>.

DURÁN, R., GUILLÉN, J., RIVERA, J., LOBO, F. J., MUÑOZ, A., FERNÁNDEZ-SALAS, L. M., ACOSTA, A. 2018. Formation, evolution and present-day activity of offshore sand ridges on a narrow, tideless continental shelf with limited sediment supply. *Marine Geology*, 397:93–107.

FERREIRA, A. L. 2020. Arquitetura sísmica do sistema de canais de maré Galinhos-Guamaré (NE do Brasil) como evidência às variações do nível do mar Holocênico. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 149p.

FERREIRA, A. L., VITAL, H., STATTEGGER, K., CALDAS, L. H. O., GOMES, M. P., PEREZ, Y. A. R., AQUINO DA SILVA, A. G. 2022. Seismic architecture of the tidal channel system of Galinhos, equatorial Atlantic, Brazil. *Marine Geology*, 443:106685.

FIELD, M.E., DUANE, D.B. 1976. Post-Pleistocene history of the United States inner continental shelf: significance to origin of barrier islands. *Geological Society of America Bulletin*, 87(5), 691–702.

FOLK, R.L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill's, Texas, 170p.

FRANCO, C. G. M., AMARO, V. E., SOUTO, M. V. S. 2012. Prognóstico da erosão costeira no litoral setentrional do Rio Grande do Norte para os anos de 2020, 2030 e 2040. *Revista de Geologia*, 25:37–55.

FREIRE, G. S. S., CAVALCANTI, V. M. M., MAIA, L. P., LIMA, S. F. 1997. Classificação dos sedimentos da Plataforma Continental do Estado do Ceará. Anais do Simpósio de Geologia do Nordeste, Fortaleza, 209–211p.

GALLOWAY, W. E., HOBDDAY, D. K. 1983. Terrigenous Clastic Depositional Systems. New York: Springer-Verlag, 423p.

GRIGIO, A. M., AMARO, V. E., VITAL, H., DIODATO, M. A. 2005. A method for coastline evolution analysis using GIS and remote sensing - a case study from Guamaré city, Northeast Brazil. Journal of Coastal Research, 42:412–421.

IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do RN. 1999. Informativo Municipal – Macau. Natal/RN, 05:1-14.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia: dados das séries temporais climáticas. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>.

LANESKY, D. E., LOGAN, B. W., BROWN, R. G., HINE, A. C. 1979. A new approach to portable vibracoring underwater and on land. Journal of Sedimentary Research, 49(2): 654-657.

LIMA, Z. M. C., ALVES, A. L., AMARO, V. E., VITAL, H. 2001. Coastline Evolution of the Galinhos Spit (NE Brazil) Using Air Photography and Landsat TM Images. Revista Pesquisas em Geociências, Ed. UFRGS, RS, 28:497-507.

LIMA, Z. M. C., VITAL, H., XAVIER, P., MEDEIROS, W. E., ANDRADE, P. R. O. 2002. Sand spits from NE Brazil: high resolution Quaternary analogous for reservoir model. Annual Meeting of American Association of Petroleum Geologist. Houston, EUA. Extended Abstracts.

LIMA, Z. M. C. 2004. Caracterização da dinâmica ambiental da região costeira do município de Galinhos, litoral norte do RN. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MASCENA, P. L. D. 2020. Avaliação de ambientes de mangue e praia/ilha-barreira quanto a contaminação por material de empréstimo através de análises estatísticas, Macau-RN. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 95 p.

MCBRIDE, R.A., ANDERSON, J.B., BUYNEVICH, I. V, CLEARY, W., FENSTER, M.S., FITZGERALD, D.M., HARRIS, M.S., HEIN, C.J., KLEIN, A.H.F., LIU, B., DE MENEZES, J.T., PEJRUP, M., RIGGS, S.R., SHORT, A.D., ET AL. 2013. Morphodynamics of barrier systems: a synthesis, in Sherman, D.J. ed., Treatise on Geomorphology: Volume 10 Coastal Geomorphology, Academic Press, San Diego, p. 166–244.

MIRANDA, R. F. L. 2021. Análise sedimentar de testemunhos por vibração em área de mangue no Campo Petrolífero de Serra (Macau/RN). Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 76 p.

MORTON, R. A., 1977, Historical shoreline changes and their causes: Transactions Gulf Coast Association of Geological Societies, v. 27, p. 352-364.

MULHERN, J. S., JOHNSON, C. L., GREEN, A. N. 2021. When Is a Barrier Island Not an Island? When It Is Preserved in the Rock Record. Frontiers in Earth Science. 8:560437.

MUNSELL. 2009. Geological Rock-Color Chart, with genuine Munsell® color chips. Geological Society of America (GSA) Rock-Color Chart prepared by the Rock-Color Chart Committee.

NERY, G. G. 2013. Perfilagem Geofísica em Poço Aberto – fundamentos básicos com ênfase em petróleo. - Rio de Janeiro: SBGf,

NICHOLS, G. 2009. Sedimentology and Stratigraphy, 2a ed. Wiley-Blackwell. 432p.

OERTEL, G.F., 1985. The barrier island system. In: Oertel, G.F., Leatherman, S.P. (Eds.), Barrier Islands. Marine Geology 63, 1–18.

PAIVA, P. T. M. 2019. Distribuição sedimentar e geomorfologia da plataforma interna adjacente ao estuário do rio Açú, Macau-RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

PAPINI, C. J. 2003. Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PEREIRA, R. M., ÁVILA, C. A., LIMA, P. R. A. S. 2005. Minerais em grãos: Técnicas de coleta, preparação e identificação. Oficina de textos.

PESSOA NETO, O.C., SOARES, U.M., SILVA, J.G.F., ROESNER, E.H., FLORENCIO, C.P., SOUZA, C.A.V. 2007. Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da Petrobras, 15:357-369.

POWERS, M. C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology, 23(2), 117-119.

REINECK H., E., SINGH, I.B. 1980. Depositional sedimentary environments. Springer, Berlin Heidelberg, New York.

RIOS, V. P. L., AMARO, V. E., VIEIRA, M.M., MATOS, M.F.A, PRUDÊNCIO, M.C., CÂMARA, M. 2016. Influência Neotectônica na Morfologia do Sistema de Ilhas Barreiras, Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia.

ROCHA, A. K. R. 2010. Caracterização morfodinâmica no estuário do rio Açú, Macau/RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ROCHA, D. R. C. 2021. Caracterização sedimentar de ilhas barreiras-pontais arenosos, no entorno do campo petrolífero de Serra, Macau/RN, a partir de testemunhos por vibração. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 82 p.

ROCHA, D. R. C., VITAL, H., MELO JUNIOR, G. 2021. Análise faciológica vertical de ilhas barreiras/pontais arenosos tropicais a partir de testemunhos por vibração, Macau (RN). In: Catarina Toledo, Julia B. Curto Ma, Paola Barbosa. (Org.). Contribuições à Ciência e Técnica dos(as) jovens geólogos(as) brasileiros(as). Brasília, 222-232p.

SANTOS, L. 2013. Pirometamorfismo nos arenitos da Formação Açú, Bacia Potiguar, NE do Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, C.G. 1991. *Holocene stratigraphy and evolution of the Açú river delta, Rio Grande do Norte state, northeastern Brazil*. Tese de Doutorado. Duke University, Durham, North Carolina, United States, 359 p.

SILVA, I. R. 2008. Ambientes Costeiros. In: SILVA, A. J. P.; ARAGÃO, M. A. F.; MAGALHÃES, A. J. C. Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil. Beca-BALL Edições, São Paulo, 212 – 223p.

SILVA, F.E., AMARO, V.E., MATOS, M.F.A. 2015. Análise Multitemporal do Campos de Dunas Móveis do Litoral setentrional do Rio Grande do Norte. In: INPE (org), Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.

SILVA, J. P. F. 2017. Levantamento de dados geofísicos (Sonografia Interferométrica) da Plataforma adjacente a Diogo Lopes – Litoral Setentrional do RN. 1-Relatório da coleta dos dados Sonográficos Interferométricos.

SILVA, A. F. R. P. 2018. Estudo de depósitos costeiros rasos da foz do rio Açú (Macau-RN) com base em perfis de raios gama, análise faciológica e fotografias de alta resolução. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, F. E. 2019. Morfodinâmica de sistemas de ilhas barreiras tropicais, litoral setentrional-RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, F.E., VITAL, H. 2019. Quantifying the high coastal dynamics of tropical mesotidal barrier island-spit systems: case study in Northeast Brazil. *Geo-Marine Letters*.

SOUTO, M. V. S. 2004. Análise multitemporal dos elementos geoambientais da região da Ponta do Tubarão, área de influência dos campos petrolíferos de Macau e Serra, município de Macau/RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOUTO, M. V. S. 2009. Análise da evolução costeira do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, região sob influência da indústria petrolífera. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 177 p.

STATTEGGER, K., CALDAS, L.H.O., VITAL, H. 2006. Holocene Coastal Evolution of the Northern Rio Grande do Norte Coast, NE, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium). Itajaí, SC, 150-155 p.

STUTZ, M. L., AND PILKEY, O. H. 2011. Open-ocean barrier islands: global influence of climatic, oceanographic, and depositional settings. *Journal of Coastal Research*, 27:207–222.

SUGUIO, K. 1980. Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica. Edgard Blucher, São Paulo.

- TABOSA, W. F., LIMA, Z. M. C., VITAL, H., GUEDES, I. M. G. 2001. Monitoramento Costeiro das Praias de São Bento do Norte e Caiçara do Norte – NE Brasil. *Revista Pesquisas em Geociências*, 28:383-392.
- TABOSA, W. F. 2002. Monitoramento costeiro das praias de São Bento do Norte e Caiçara do Norte-RN: Implicações para o pólo petrolífero de Guamaré. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- TERRY, R.D., CHILINGARIAN, G.V. 1955. Summary of “Concerning some additional aids in studying sedimentary formations”. *Journal of Sedimentary Petrology*, 25:229-234.
- VALENTIM DA SILVA, D. R., AMARO, V.E. 2008. Integração entre dados ópticos e Radar (SRTM) para a caracterização geoambiental da costa setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista Geográfica Acadêmica*, 2(2):111-123
- VASCONCELOS, E. P.; LIMA NETO, F. F., ROOS, S. 1990. Unidades de correlação da formação Açú – Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., Natal. Anais... Natal: SBG/NE, 1:227-240.
- VITAL, H., LIMA, Z. M. C., SILVEIRA, I. M., AMARO, V. E., SOUTO, M. V. S. 2003. Barrier-Spit System From The Northern Rio Grande do Norte State Coast, NE Brazil: A Tectonic Control ? *Proceedings of The 3th Latin-American Congress on Sedimentology*, 113-115p.
- VITAL, H., SOUZA, F. E., LIMA, Z. M. C., SILVEIRA, I.M., AMARO, V. E., SOUTO, M. V. S., CHAVES, M. S., CALDAS, L. H. O. 2004. Shoreline Mobility of Mesotidel Sandy Beaches in the Northeastern Brazil: Implications to Oil and Gas Exploration on the Potiguar Basin (NE Brazil). I: AAPG, Annual Meeting. Dallas/Texas. CD-ROM.
- VITAL, H., SILVEIRA, I. M., AMARO, V. E. 2005b. Carta sedimentológica da plataforma continental Brasileira - área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23:233–241.
- VITAL, H., AMARO, V. E., SILVEIRA, I. M. 2006. Coastal erosion on the Rio Grande do Norte State (Northeastern Brazil): Causes and factor versus effects associated processes. *Journal of Coastal Research*, 39:1307-1310.
- VITAL, H., NETO, F. S., PLÁCIDO JÚNIOR, J. S. 2008. Morfodinâmica de um canal de maré tropical: Estudo de caso na costa norte riograndense, Nordeste do Brasil. *Gestão Costeira Integrada*, 8:113–126.
- VITAL H. 2009. The Mesotidal Barriers of Rio Grande do Norte. In: *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil. Lecture Notes in Earth Sciences*, Springer, Berlin, Heidelberg, 107: 289-324.
- VITAL, H., TABOSA, W. F., SOUZA, Z. S., FARIAS, P. R. C., LIMA, Z. M. C., ARAÚJO, P. C., CÓRDOBA, V. C., SOUSA, D. C. 2013. Programa Geologia do Brasil: Geologia e Recursos Minerais da Folha Jandaíra. Folha SB.24-X-D-III, Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:100.000. Recife: CPRM.

VITAL, H. et al. 2018a. Avaliação das características físicas e texturais de solos do campo de Serra. Convênio PETROBRAS/UFRN/FUNPEC, Relatório Parcial 01: Descrição das Atividades de Campo Realizadas.

VITAL, H. et al. 2018b. Avaliação das características físicas e texturais de solos do campo de Serra. Convênio PETROBRAS/UFRN/FUNPEC, Relatório Parcial 02: Descrição da execução das atividades de laboratório e de interpretação de dados.

WALKER, R. G. 1984. Facies Models. 2. Ed. Geological Association of Canada, Geoscience Canada Reprint Series.

XAVIER NETO, P., LIMA, Z. M. C., ANDRADE, P. R. O., OLIVEIRA Jr., J. G., MEDEIROS, W. E., VITAL, H. 2001. GPR images of the Galinhos Península, NE Brazil: the register of a geologic evolution from paleochannel to a sand spit ?. Proceedings of the I Symposium about GPR in sediments. Geological Society and UCL. London.

ANEXO – ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA QUATERNARY & ENVIRONMENTAL GEOSCIENCES

Sedimentação holocênica em canais de maré e ilhas barreiras mesomaráis no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, NE do Brasil

Dhulya Rafaelly das Chagas Rocha¹, Helenice Vital^{1,2}, Filipe Ezequiel da Silva¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.



² Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

Quaternary and Environmental Geosciences

#93563 SINOPSE

RESUMO AVALIAÇÃO EDIÇÃO

SUBMISSÃO

Autores	Dhulya Rafaelly das Chagas Rocha, Helenice Vital, Filipe Ezequiel da Silva	
Título	Sedimentação holocênica em canais de maré e ilhas barreiras mesomaráis no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, NE do Brasil	
Documento original	93563-378511-1-SM.DOCX	29-11-2023
Docs. sup.	Nenhum(a)	INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR
Submetido por	Dhulya Rafaelly das Chagas Rocha 	
Data de submissão	novembro 29, 2023 - 02:46	
Seção	Sedimentologia, estratigrafia e evolução de planícies costeiras	
Editor	Carlos Guedes 	Sérgio Dillenburg 