

Sedimentação holocênica em Sistemas de Ilhas Barreiras mesomarés no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, NE do Brasil

Holocene sedimentation in mesotidal barrier island systems in the Northern Coast of Rio Grande do Norte State, NE Brazil

Dhulya Rafaelly das Chagas Rocha^{ab} , Helenice Vital^{ac} , Filipe Ezequiel da Silva^{ad} 

^aPrograma de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

^bdhulyarafaelly@hotmail.com, ^chelenicevital2004@yahoo.com.br, ^dezequielevaldo@gmail.com



© 2024 The authors. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons license.

Resumo

Na costa norte do estado do Rio Grande do Norte destaca-se a presença de um sistema de barreiras arenosas, que são corpos arenosos dispostos paralelos à linha de costa, que isolam áreas protegidas do impacto do mar aberto. Esse sistema apresenta em seu lado marinho e terrestre diferentes depósitos sedimentares, sendo a caracterização e análise desse sistema de extrema relevância tanto para estudos ambientais quanto para pesquisas relacionadas a reservatórios de óleo e gás. O objetivo central deste estudo consistiu na caracterização e interpretação sedimentar/estratigráfica do sistema de barreiras tropicais situados ao longo da costa norte do estado, nas proximidades da cidade de Macau. A pesquisa incorporou dados de amostras de superfície provenientes de depósitos de canais, planícies e deltas de maré, praias/barreiras e leques de sobrelavagem, testemunhos coletados das regiões de barreira e retrobarreira, bem como dados batimétricos dos canais de maré. Os canais de maré exibiram profundidades variando de 1,3 a -6,3 metros, neles foram identificadas áreas com dunas subaquáticas 2D e 3D, de tamanho variando de pequenas a grandes. Semelhanças observadas entre os sedimentos das amostras de superfície e dos testemunhos contribuíram para a interpretação dos elementos deposicionais correlacionados com 4 associações de fácies que foram identificadas: canais de maré, planície de maré, praia/barreira e pós-praia. A partir da análise da sequência vertical dos testemunhos, juntamente a séries temporais de imagens de satélite, foi possível interpretar a evolução dos elementos deposicionais presentes nos sistemas de ilhas barreiras da região. Nesses sistemas altamente dinâmicos, a transição entre os diferentes depósitos pode ocorrer em menos de uma década.

Palavras-chave: Ilhas barreira; Pontais arenosos; Batimetria; Testemunhos; Sequência Sedimentar.

Abstract

On the northern coast of the state of Rio Grande do Norte, the presence of a system of sandy barriers stands out, which are sandy bodies arranged parallel to the coastline, and isolate protected areas from the impact of the open sea. This system has different sedimentary deposits on its seaward and landward sides, making the characterization and analysis of this system extremely relevant for both environmental studies and research related to oil and gas reservoirs. The main aim of this study was the sedimentary/stratigraphic characterization and interpretation of tropical barrier system located along the northern coast of the state, near the city of Macau. The research incorporated data from surface samples from channel deposits, tidal flats and deltas, beaches/barriers and overwash fans, cores collected from barrier and back-barrier regions, as well as bathymetric data from tidal channels. The tidal channels exhibited depths ranging from 1.3 to 6.3 meters, areas with 2D and 3D subaqueous dunes were identified, varying in size from small to large. Similarities observed between the sediments of the surface samples and the cores contributed to the interpretation of the depositional elements associated with 4 facies associations that were identified: tidal channel, tidal flat, beach/barrier and backshore. From the analysis of the vertical sequence of the cores, together with the time series of satellite images, it was possible to interpret the evolution of the depositional elements present in the region's barrier island systems. In these highly dynamic systems, the transition between the different deposits can occur in less than a decade.

Keywords: Barrier Islands; Spits; Bathymetry; Cores; Sedimentary Sequence.

1. Introdução

Sistemas de Ilhas Barreiras perfazem ao menos 6% dos ambientes deposicionais de costeiros de todo o mundo (Stutz & Pilkey 2011), sendo notadamente marcados pela presença de depósitos arenos-cascalhosos inconsolidados, originados pela ação das ondas, e que estabelecem um ambiente a sua retaguarda (retrobarreira) abrigado dos processos da região de mar

aberto (Hayes & FitzGerald 2013, Otvos 2012). Apesar de serem principalmente referidas como ilhas, as barreiras propriamente ditas também podem ocorrer presas ao continente (e.g. pontal arenoso/espórtão/*spit*) ou ainda assumir uma diversidade de formas haja vista as condições hidrodinâmicas prevalecentes (ondas e/ou marés), os aspectos fisiográficos linha de costa, a capacidade de circulação de água e o aporte sedimentar

(Van Heteren 2015, Pilkey, 2006, Elko & Davis 2006, Hayes 1979).

A face da ilha barreira voltada ao mar constitui a região de espraiamento, sendo especialmente modelada pelas ondas e correntes de deriva litorânea. Enquanto na face voltada para o continente prevalecem processos eólicos e galgamento oceânico (*washover*) que, respectivamente, materializam-se na forma de dunas frontais e leques de sobrelavagem. Já a retrobarreira é composta por vários elementos deposicionais, incluindo planícies e canais de maré, manguezais e deltas de maré de enchente, nos quais o processo de transporte predominante são as correntes de marés.

A modificação e evolução das 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 (Chang et al. 2006, Caldas et al. 2006, Silva 1991, Field & Duane 1976). Fatores como nível relativo do mar, processos costeiros, clima, balanço sedimentar e atividades humanas controlam o desenvolvimento dessas ilhas barreiras (Van Heteren 2015, Morton 1979).

No litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil, os sistemas de ilhas barreiras associam-se a corpos arenosos dispostos paralelamente à linha de costa, transitando entre ilhas barreiras e pontais/ esporões, que evoluem entre si de maneira cíclica, ocasionando abertura e fechamento de canais de maré (Silva & Vital 2019, Vital et al. 2008). Essas barreiras ocorrem estritamente no litoral norte do Estado e sua distribuição está limitada pelos sistemas de falhas Carnaubais e Afonso Bezerra (Fig. 1).

A região de estudo é caracterizada como uma costa de energia mista, sendo dominada por ondas e marés (Vital et al. 2008) e apresenta uma dinâmica costeira muito intensa, capaz de provocar migração das barreiras a taxas de 100 m/ano (Silva & Vital 2019, Vital et al. 2018). Essa intensa dinâmica da região põe em risco atividades produtivas situadas nas proximidades da linha de costa, especialmente as instalações da indústria petrolífera e de energia eólica (Vital et al. 2018, Chaves et al. 2006). E por esse motivo, muitos trabalhos destinaram-se ao reconhecimento da dinâmica desses ambientes (Vital et al. 2003, 2004, 2006, Grigio et al. 2005, Chaves et al. 2006, Castro et al. 2011, Franco et al. 2012, Rios et al. 2016, Vital et al. 2018, Silva & Vital 2019).

A caracterização sedimentar dos sistemas de ilhas barreiras do RN, por sua vez, permanece um campo pouco explorado. De modo geral, os trabalhos destinados a esse fim tem se restringido a apenas alguns constituintes desses sistemas (e.g. Costa Neto 2009, Silveira 2002), ou limitam-se a análises por sondagens rasas da subsuperfície (Rios & Amaro 2012, Caldas et al. 2006, Caldas 2002, Silva 1991), sem antes descrever os depósitos superficiais correlatos. Assim, esse trabalho objetiva aprimorar as caracterizações e

interpretações sedimentares/estratigráficas desses sistemas de ilhas barreiras através de amostragem superficial ao longo de seus diferentes depósitos, associando-as a sondagens rasas da subsuperfície e análise das formas de leitos de canais de maré, de modo a possibilitar uma melhor compreensão da evolução de sequências sedimentares apresentadas por esses sistemas.

O conhecimento sobre os processos que atuam nestes ambientes e sua configuração sedimentar/estratigráfica é de suma importância tanto para estudos ambientais, quanto de análogos de reservatórios de óleo e gás, uma vez que, de acordo com Vasconcelos et al. (1990), a Formação Açu-4, unidade da Bacia Potiguar, é correlacionada a sistemas de barreiras costeiras.

2. Área de estudo

2.1 Localização

A área de estudo encontra-se localizada no litoral setentrional do Rio Grande do Norte, em uma região de barreiras arenosas, situada próximo aos distritos de Diogo Lopes e Barreiras, município de Macau/RN, distante aproximadamente 185 km da capital do estado (Natal/RN) (Fig. 1).

2.2 Contexto geológico

No contexto geológico regional a área está inserida na parte central da Bacia Potiguar emersa, na porção recoberta por depósitos sedimentares quaternários, relacionados ao Pleistoceno e Holoceno.

Os sedimentos presentes na zona costeira onde está localizada a área de estudo compreendem unidades holocênicas que constituem Depósitos Litorâneos Praiais, Depósitos Eólicos Litorâneos Vegetados e Não Vegetados, Depósitos de Mangue e Depósitos Flúvio-Marinhos (Vital et al. 2013, Bezerra et al. 2009).

Os depósitos litorâneos praiais são representados por sedimentos de praia, principalmente da zona de estirâncio (faixa de praia exposta entre o limite de pré-mar e baixa-mar), sendo compostos por areias quartzosas com granulometria variando de muito fina a muito grossa, de coloração cinza claro a esbranquiçado, rica em bioclastos e, por vezes, minerais pesados (Vital et al. 2013). Os depósitos eólicos se localizam na faixa litorânea, sendo representados por campos de dunas que podem ser móveis ou estar fixados por vegetação. De acordo com Vital et al. (2013), esses depósitos são compostos por areias quartzosas de granulometria fina a média, bem selecionadas de composição quartzosa, por vezes com fragmentos de conchas e níveis de minerais pesados. Os depósitos de mangue estão relacionados a ecossistemas florestais costeiros de influência marinha, ocorrendo nas áreas abrigadas pelas ilhas barreiras ou nas desembocaduras dos rios. Nesses depósitos os sedimentos são caracterizados pela elevada quantidade de material lamoso (silte e argila)

com areia fina subordinada, bem como pela forte presença de bioturbações (Bezerra et al., 2009). Os depósitos flúvio-marinhos também ocorrem em áreas abrigadas (retrobarreira e foz de rios), associando-se a

planícies e canais de maré. Constituem-se por camadas de areia muito fina, cinza-esverdeada, intercaladas com sedimentos siltico-argilosos escuros, pobemente selecionados e com alto teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica (Bezerra et al. 2009).

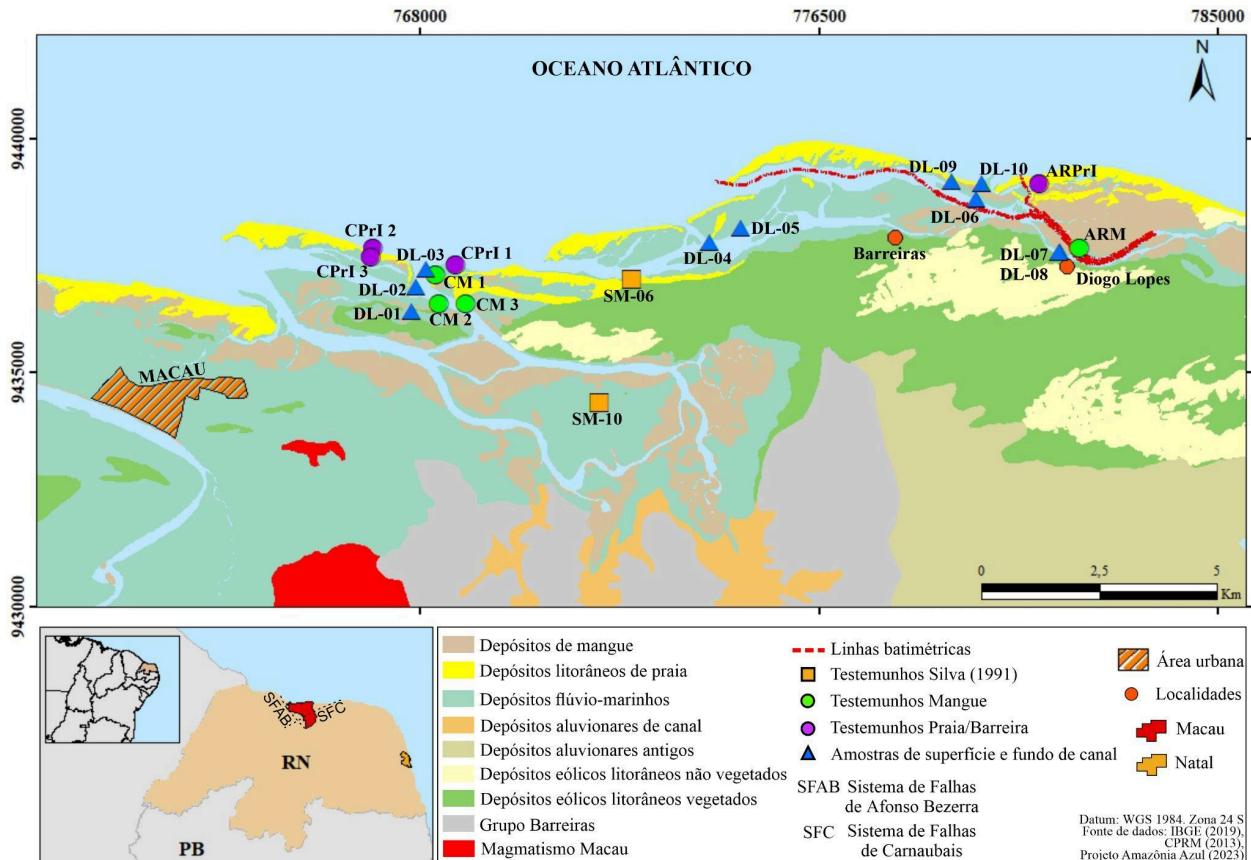


Figura 1 – Localização e geologia da área de estudo e pontos de amostragem.

2.3 Aspectos Fisiográficos

A área de estudo é caracterizada por um clima tropical equatorial quente, semiárido, considerando a classificação de Nimer (1989). De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média anual é 29°C, com máxima de 34°C e mínima de 22°C. A região é caracterizada por duas estações, uma seca entre os meses de junho a janeiro e outra úmida (inverno) com chuva nos meses de fevereiro a maio. A precipitação média anual fica em torno de 500 mm.

De março a setembro predominam na região os ventos alísios de E/SE (leste-sudeste), enquanto nos meses de outubro a fevereiro sopram principalmente os ventos alísios de E/NE (leste-nordeste), os quais são mais competentes no transporte sedimentar. Segundo dados da Normal Climatológica Provisória de 1986-2015 da estação convencional de Macau/RN, as maiores velocidades médias dos ventos ocorrem entre agosto e dezembro, durante o período seco, com velocidade máxima de 5,9 m/s. Já as menores velocidades são registradas de fevereiro a julho (entre 4,5 e 4,8 m/s), durante o período chuvoso.

A feição hidrográfica de maior destaque na área é o estuário do rio Piranhas-Açu, cuja descarga fluvial é controlada pela Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (município de Itajá), situada a mais de 70 km da foz. Os demais rios da região são de caráter intermitente, com insignificante fluxo fluvial. A penetração das marés no interior da planície costeira provoca a formação de canais de maré, que são denominados como rios na cartografia existente (Vital et al. 2013), como os “rios” Casqueira e Conceição, a leste da cidade de Macau. Os canais de maré são curvilíneos, relativamente estreitos e rasos.

2.4 Processos Costeiros

As ondas chegam à costa na mesma direção dos ventos predominantes, vindos de E/NE (Alves et al. 2003). Chaves et al. (2006) realizaram estudos no trecho de praia entre a Ponta do Tubarão e o canal de maré Corta Cachorro (Macau/RN), e registraram variação na altura das ondas de 0,1 a 0,7 metros e o período de 3,3 a 8,0 segundos.

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). As correntes de deriva litorânea que atingem a costa possuem uma maior capacidade de transporte de sedimentos, com velocidades entre 0,1 m/s e 1,8 m/s, segundo Chaves et al. (2006). Subordinadamente ocorrem as correntes de maré, 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 (Costa Neto 2009).

A área de estudo é caracterizada por um regime de mesomaré semi-diurna, com altura máxima de 3,3 metros durante as marés de sizígia e 2,5 metros nas marés de quadratura (Vital 2009, Vital et al. 2016). Nessa região a maré apresenta condições bastante energéticas, refletida na presença de deltas de maré de vazante ao longo do sistema ilhas barreiras-pontais arenosas e na foz dos rios (Vital et al. 2008).

3. Materiais e Métodos

3.1 Batimetria

Devido à existência de canais de maré na região, uma abordagem para caracterizar as feições presentes no fundo dos canais é através do uso de métodos indiretos de amostragem. Nesse sentido, a batimetria foi aplicada para estudar os canais de maré, possibilitando a obtenção de informações sobre a configuração batimétrica e geomorfológica do fundo.

O canal de maré analisado nesta pesquisa corresponde ao popularmente conhecido "Rio" Tubarão, situado nas proximidades do distrito de Diogo Lopes.

Os dados de batimetria foram adquiridos com um Sonar interferométrico 4600, fabricado pela empresa Edgetech®, entre os meses de novembro e dezembro de 2017. O equipamento foi anexado na lateral bombordo da embarcação, por meio de um tubo de aço. A amarração geográfica do levantamento batimétrico foi realizada através de antena GPS e giroscópio (GYRO). Enquanto as correções de movimento da embarcação foram obtidas por meio do sensor de movimento TSS DMS-05 (Teledyne®) montado o mais próximo do centro de massa da embarcação. Os offsets foram medidos, com o auxílio de uma trena. Em função da baixa profundidade e largura, as linhas de insonificação batimétrica foram distribuídas longitudinalmente ao canal.

O processamento dos dados batimétricos foi realizado no software CARIS HIPS and SIPS 11.4, no qual foi feita a limpeza de dados e gerada a superfície do canal. A análise dos dados foi realizada no software Fledermaus (QPS®), no qual foram gerados perfis batimétricos da área de estudo e a partir deles realizadas análises e medições de parâmetros de forma das dunas a fim de classificá-las.

Parâmetros morfológicos das dunas tais como altura (H), comprimento (L), comprimento da projeção horizontal do lado 1 (L1) e 2 (L2), índice de ondulação

(RI, com $RI=L/H$), e índice de assimetria (AI, com $AI=(L1-L2)/L$) foram medidos com base em perfis realizados a partir dos dados batimétricos indicados na Fig. 3.

3.2 Testemunhos

Para o estudo de sedimentos em subsuperfície foram utilizados testemunhos coletados através do método de testemunhagem por vibração (Martin et al. 1995), que permite a recuperação de testemunhos contínuos e não perturbados de materiais não consolidados, pouco compactados ou semi-litificados. Nessa técnica um tubo de alumínio penetra no sedimento a partir de vibrações produzidas por um motor. Os tubos são retirados do substrato com auxílio de uma talha, e retém os sedimentos aprisionados no seu interior por meio de uma trava coletora. As coletas foram realizadas em regiões das barreiras arenosas e manguezal durante a baixa-mar de marés de sizígia, em abril de 2018.

Após a coleta, os testemunhos foram fotografados, analisados com coregama e descritos visualmente (cor, granulometria, presença de matéria orgânica, bioclastos e estruturas sedimentares).

Quatro intervalos de amostragem principais foram definidos (5 a 10 cm, 33 a 38 cm, 62 a 67 cm e 90 a 95 cm), outros intervalos de 5 cm foram amostrados, quando apresentavam características diferentes ou quando os testemunhos eram maiores que 100 cm. Nesse material foram realizadas análises granulométricas, teor de carbonato e teor de matéria orgânica.

Inicialmente as amostras foram lavadas, secas, quarteadas e separados 10 g do material (5 g para determinação do teor de carbonato e 5 g para matéria orgânica). O restante foi pesado para análise granulométrica, que utilizou peneiras com aberturas de malha de 2 mm, 1 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm, 0,063 mm. A determinação do teor de carbonato de cálcio foi feita a partir da reação das amostras com ácido clorídrico (HCl) a 10%, calculando-se a diferença entre a massa inicial e final de cada amostra. De forma semelhante o teor de matéria orgânica total foi calculado a partir da diferença de massa, nesse caso, antes e depois de o sedimento ser colocado em uma mufla durante 5 h à temperatura de 600 °C.

3.3 Amostras de Superfície

De modo a caracterizar os sedimentos encontrados no sistema de barreiras foram realizadas coletas de amostras em 10 pontos dos diferentes elementos deposicionais (ilhas, pontais arenosos, deltas de maré de enchente e vazante, planícies de maré e canais de maré). A coleta foi efetuada em maio de 2023, onde as amostras de superfície foram coletadas utilizando-se de uma concha pegadora de material, enquanto as amostras de fundo dos canais de maré foram retiradas com auxílio de um amostrador de sedimentos van Veen. Os sedimentos foram acondicionados em sacos

plásticos e nomeados para posterior análise em laboratório.

As amostras foram inicialmente lavadas, para retirada do sal. Após a lavagem retirou-se o excesso de água e foi separado uma pequena quantidade de material para fazer a análise granulométrica, que foi realizada utilizando o analisador de tamanho de partícula por difração a laser Microtrac S3500.

O restante do material foi seco em uma estufa à 60°C e após secagem foi retirado 10 g para a determinação do teor de carbonato, realizado a partir da reação entre o sedimento e ácido clorídrico (HCl) a 10%, e 10 g para quantificação do teor matéria orgânica, a partir da incineração da amostra na mufla.

4. Resultados e Discussões

4.1 Batimetria

A batimetria do canal de maré “Rio” Tubarão revelou um ambiente relativamente raso e homogêneo. As profundidades variaram entre 1,3 e -6,3 m, embora

predomine no canal cotas próximas a -2 m, como evidenciado pela predominância de tons de verde (Fig. 2). A topografia predominante do fundo é relativamente plana, sem feições de fundo proeminentes, notadamente indicada na Fig. 2 pela uniformidade de cores, demonstrando ausência de variações abruptas no relevo subaquático. Profundidades positivas associam-se à entrada de sedimentos provocadas pela abertura e migração de canais de maré, bem como pela formação de deltas de maré. Ressalta-se que os resultados apresentados refletem a configuração do canal por um curto período, uma vez que se localizam em um ambiente de dinâmica intensa.

As características morfológicas do leito do canal exibiram pouca variação, com destaque para áreas de fundo relativamente plano (extensão > 1 km), micro-ondulações e dunas subaquosas (Fig. 2). Estas últimas concentram-se em dois trechos distintos desse canal de maré, aqui denominadas como Área 1 e 2, ocupando faixas consideráveis do fundo (< 700 m de extensão).

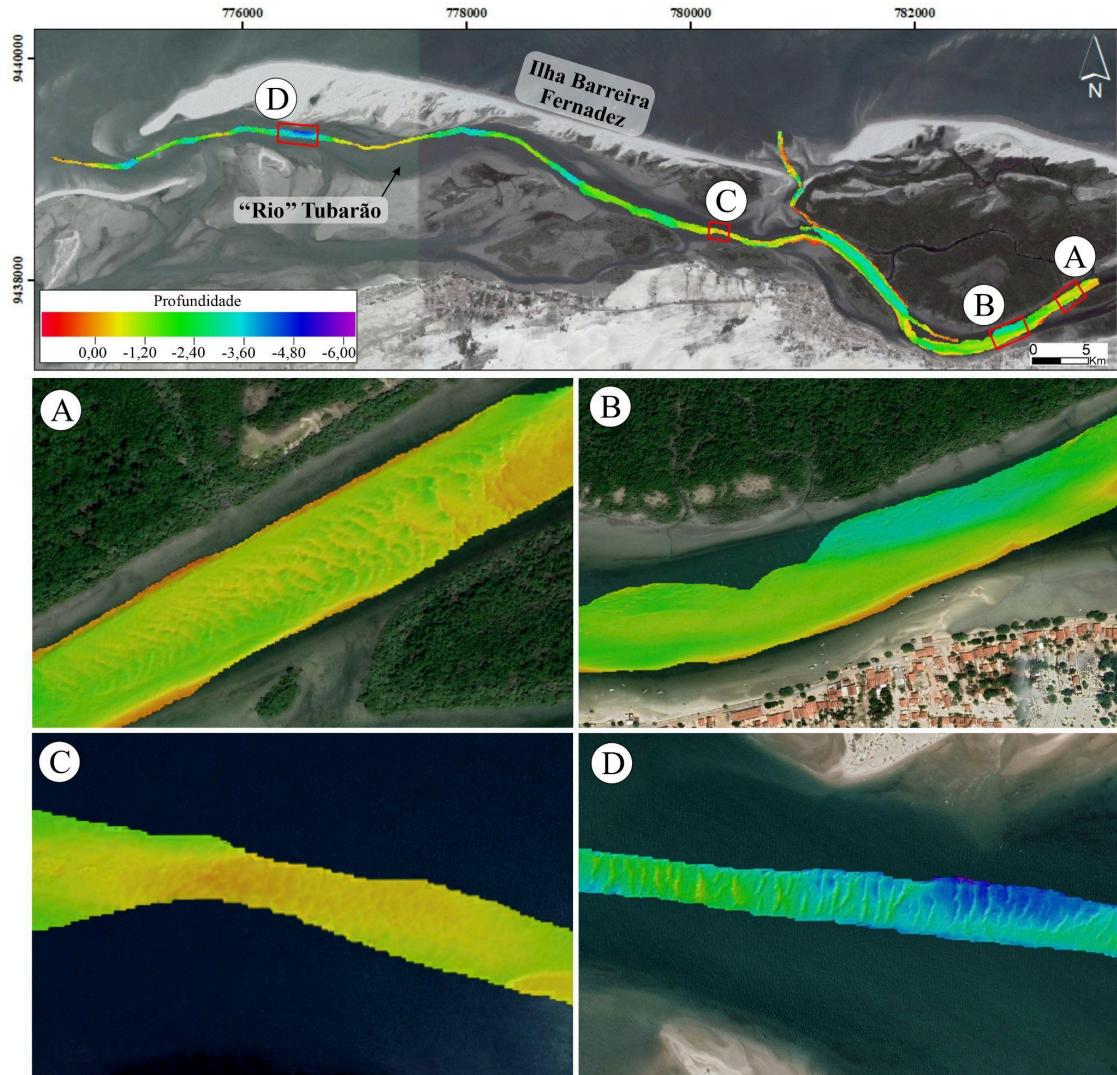


Figura 2 –Mapa batimétrico destacando as principais feições de fundo identificadas no canal de maré “Rio” Tubarão. A e D - Áreas com dunas subaquosas; B – Área de fundo relativamente plano; C – Micro-ondulações subaquosas.

A Área 1 situa-se na parte mais interna do canal, próximo a região do Minhoto (Fig. 3), com dunas subaquosas distribuídas em uma área de aproximadamente 410 m de extensão. Essas formas de leito apresentam cristas variando de leve a fortemente sinuosas, por vezes bifurcadas ou ramificadas (Fig. 3). A altura média é da ordem de 0,4 m, enquanto o espaçamento das cristas é 11,5 m, o que permite classificá-las, como dunas 3D pequenas a médias, de acordo com Ashley (1990). O índice de ondulação (RI), com média de 32, permitiu indicar, segundo Reineck e Singh (1980), que essas ondulações foram geradas por corrente. O índice de assimetria (AI), apresentou valor médio de -0,2, de acordo com Durán et al. (2018), possuindo um fluxo no sentido NE para SW, com a vertente mais acentuada voltada para sudoeste, que corresponde a direção do fluxo da vazante residual, predominante na região, o que classifica essas dunas como feições dominadas pela vazante.

O aparecimento de dunas subaquosas nessa região em detrimento das demais, foi atribuído ao grande aporte de sedimentos eólicos advindo da região do Minhoto (esporão arenoso), cujo fluxo eólico mais competente da região dá-se no sentido NE-SW, o que tem causado o assoreamento do canal de maré nesse trecho, uma vez que se nota uma diminuição da profundidade associada ao acúmulo de sedimentos na região a NE do canal.

A Área 2 encontra-se na retaguarda da ilha do Fernandez, próximo à desembocadura do canal (Fig. 3). É uma região com cerca de 650 m de extensão, onde predominam dunas subaquosas com cristas retilíneas a levemente sinuosas (Fig. 3). Nessa área as dunas apresentaram em média 0,7 m de altura e espaçamento médio de 14,9 m, o que permitiu classificá-las como dunas 2D a 3D, de porte médio a grande. O índice de ondulação (RI) calculado teve média de 23, indicando, assim como na Área 1 que as dunas foram geradas por corrente. O índice de assimetria (AI) teve com valor médio de -0,1, com maioria das dunas apresentando fluxo no sentido E para W, e vertente mais acentuada para oeste, correspondente à direção do fluxo da vazante residual e, assim como na Área 1, sendo classificadas como feições dominados pela vazante.

Dunas subaquosas são feições comuns a outros canais de marés da região, a exemplo do complexo estuarino-lagunar de Galinhos e Guamaré (Ferreira et al. 2022, Costa Neto 2009). Naquele sistema, as dunas subaquosas exibiram diferentes comprimentos, abrangendo desde pequenas até grandes, com um perfil assimétrico e inclinação em direção à maré vazante. De acordo com Costa Neto (2009), as diferenças de duração e velocidade entre as correntes de maré no interior do canal evitam a destruição dessas dunas e impedem sua reversão na direção da maré enchente. No entanto, marcas de ondas sobrepostas podem ser erodidas ou ter sua direção de fluxo revertida.

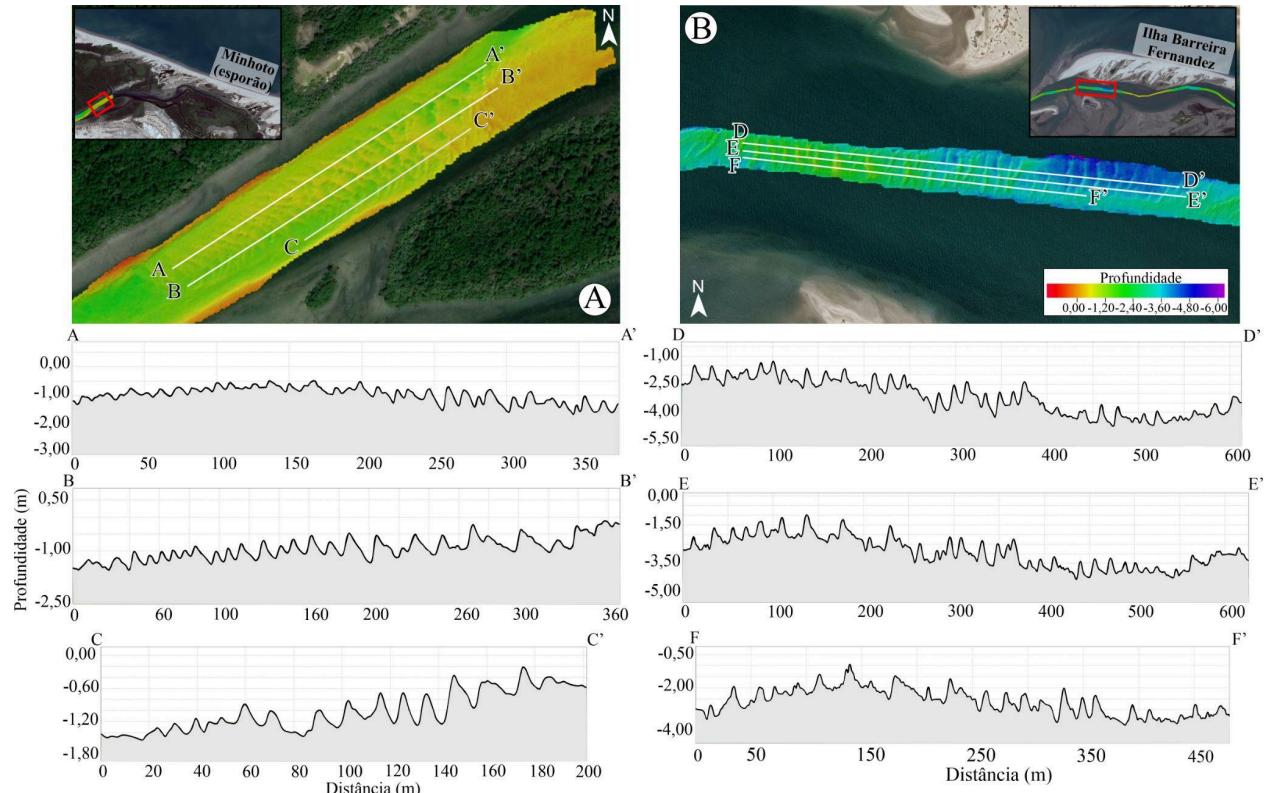


Figura 3: Áreas de dunas subaquosas identificadas no canal de maré. A - Perfis batimétricos analisados na Área 1; B - Perfis batimétricos analisados na Área 2.

4.2 Amostras de superfície

Para uma caracterização abrangente dos componentes do sistema de ilhas barreiras, foram coletadas amostras em 10 pontos distintos dentro de seus diversos elementos deposicionais.

Planícies de maré

Os ambientes de planícies de maré foram caracterizados através das amostras DL-01, DL-05 e DL-08 (Fig. 4), onde as duas primeiras são representantes de regiões sem grande influência antrópica, enquanto a última caracteriza um ambiente fortemente influenciado pela atividade humana, devido sua proximidade com o distrito de Diogo Lopes. A amostra DL-01 foi coletada em uma região de ilha interiorizada, por trás da ilha Corta Cachorro, na região intermaré na margem de um canal secundário (Fig. 4). A amostra DL-05 foi coletada em uma ampla região de planície de maré entre as ilhas barreira Ponta do Tubarão e Fernandez, onde foi observada a presença de conchas e fragmentos de conchas, musgo e marcas onduladas na superfície (Fig. 4). A amostra DL-08, por sua vez, foi coletada na porção intermaré da margem do canal próximo a Diogo Lopes.

Nas amostras DL-01 e DL-05 predominaram as frações areia fina e muito fina, com significativa quantidade de silte (13 e 22%). Enquanto a amostra DL-08 apresentou granulometria predominante areia

média (Tabela 1). O teor de matéria orgânica variou entre 0,26 e 0,85%, enquanto o teor de carbonato de cálcio ficou entre 2,63 e 19,68% (Tabela 1). Esses resultados são condizentes aos que Costa Neto (2009) observou para interface limítrofe entre canais e planícies de maré. O alto teor de carbonato de cálcio em algumas amostras é o reflexo da abundância de conchas em posição de vida e fragmentos conchas. Já o baixo teor de matéria orgânica aqui apresentado é justificado pela ausência de florestas de mangue nas áreas amostradas.

Canais de maré

Os ambientes de canais de maré foram caracterizados através das amostras DL-02, DL-04 e DL-07 (Fig. 5), sendo a primeira delas correspondente à desembocadura de um canal de maré principal (*tidal inlet*), enquanto as demais representam canais de maré secundários (*tidal channels*). As larguras dos canais na região chegam a 500 m para os canais principais e variam de 50 a 100 m para os canais secundários. A amostra DL-02 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 (Fig. 5). A amostra DL-04 foi coletada em um canal amplo, com cerca de 200 m de largura, próximo à ilha barreira Ponta do Tubarão (Fig. 5). Já a amostra DL-07 foi coletada em um canal de maré mais estreito (<50 m), que margeia o distrito de Diogo Lopes.

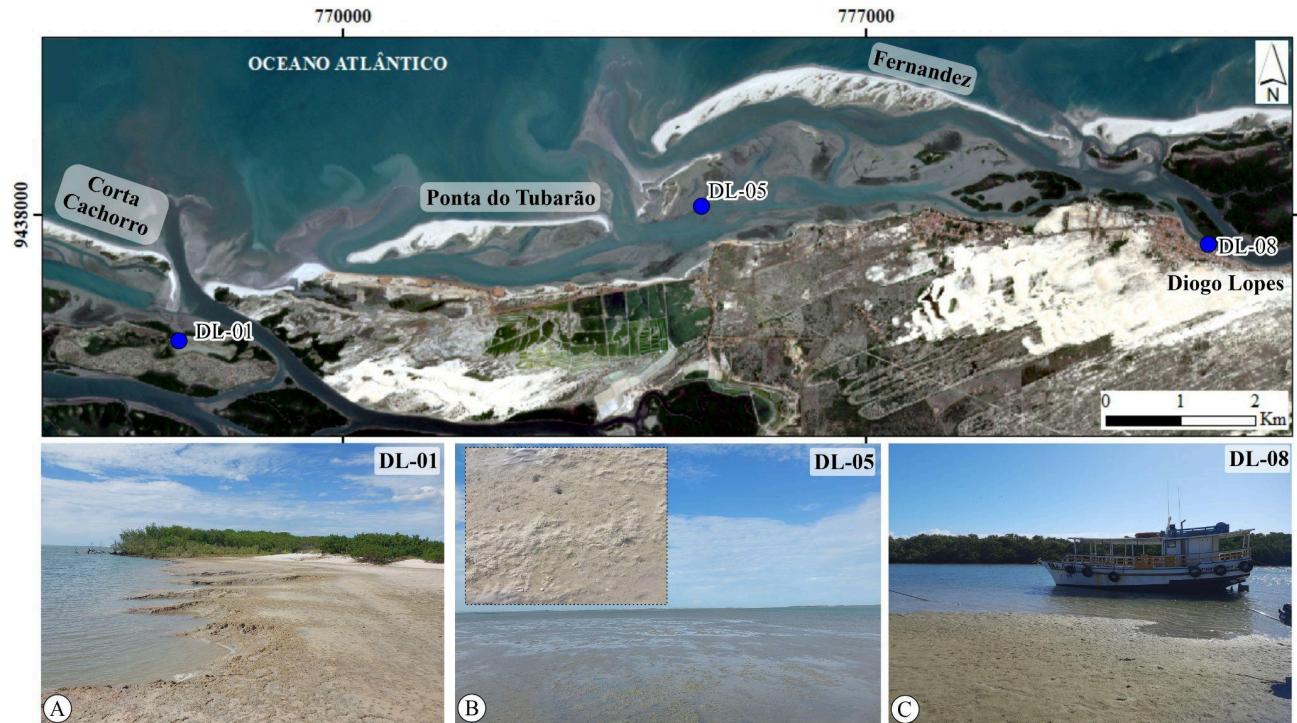


Figura 4: Localização e características do local de coleta das amostras DL-01, DL-05 e DL-08. A – Visão geral da região onde foi coletada a amostra DL-01; B - Visão geral da área de coleta da amostra DL-05, detalhe na parte superior esquerda mostrando o sedimento amostrado; C – Área de coleta da amostra DL-08, próximo ao distrito de Diogo Lopes.

Tabela 1: Características das amostras de superfície e fundo de canal.

Elemento deposicional	Amostra	Granulometria						Carbonato de Cálcio		Máteria Orgânica
		C	AMG	AG	AM	AF	AMF	S	A	
Planície de Maré	DL-01	0%	0%	0%	9%	46%	23%	22%	0%	2,63%
	DL-05	0%	0%	0%	4%	41%	42%	13%	0%	19,68%
	DL-08	0%	0%	4%	48%	39%	4%	5%	0%	3,13%
Canal de Maré	DL-02	39%	11%	16%	18%	13%	3%	0%	0%	20,80%
	DL-04	0%	0%	3%	38%	56%	3%	0%	0%	3,63%
	DL-07	0%	0%	12%	56%	25%	2%	5%	0%	8,80%
Barreira arenosa	DL-09 A	0%	0%	1%	41%	56%	2%	0%	0%	3,52%
	DL-09 B	0%	10%	26%	51%	13%	1%	0%	0%	7,35%
	DL-10 A	0%	0%	2%	46%	51%	1%	0%	0%	3,07%
Delta de Maré	DL-10 B	0%	0%	0%	34%	62%	4%	0%	0%	2,52%
	DL-03	0%	0%	0%	20%	72%	8%	0%	0%	4,41%
	DL-06	0%	3%	10%	50%	35%	2%	0%	0%	5,92%

C – Cascalho, AMG - Areia muito grossa, AG - Areia grossa, AM - Areia média, AF – Areia fina, AMF - Areia muito fina, S – Silte, A - Argila.



Figura 5: Localização e características do local de coleta das amostras DL-02, DL-04 e DL-07. A – Visão geral do canal onde foi coletada a amostra DL-02, a imagem na parte superior direita mostra em detalhe os sedimentos coletados, com areia e muitos bioclastos; B - Visão geral da região de coleta da amostra DL-04, com detalhe na parte superior direita mostrando o sedimento coletado; C – Canal onde foi realizada a coleta da amostra DL-07, próximo a Diogo Lopes.

Deste modo, DL-02 indicou um ambiente muito energético rico em cascalho (39%) bioclastico, prevalecendo frações de areia muito grossa a média (45%), em detrimento das frações mais finas (16%). Os canais de maré secundários, por sua vez, revelaram-se relativamente menos energéticos, onde predominam as granulometrias de areia média especialmente em DL-07 (56%), e areia fina em DL-04 (56%, vide Tabela 1). O teor de carbonato de cálcio variou entre 3,63 e 20,80%, enquanto o teor de matéria orgânica oscilou entre 0,16 e 1,3% (Tabela 1).

Características semelhantes foram encontradas por Röber et al. (2005) no complexo de canais de maré de Guamaré e Galinhos, onde sedimentos mais grossos ocorrem próximo às desembocaduras, com canais de maré interiorizados apresentando granulometria mais finas, especialmente nas porções que se apresentam mais amplos. Esse aspecto, em específico, pode justificar as variações texturais observadas nas amostras dos canais secundários, uma vez que DL-04 representa um canal cinco vezes mais largo (≈ 200 m) do que DL-07 (≈ 40 m). Depósitos de canais de maré texturalmente mais finos também podem ser explicados

pela perda de energia local face à abertura de novos canais sobre as ilhas barreiras (Silva & Vital 2019).

Praia/Barreira

Os depósitos de praia/barreira foram caracterizados através de amostragens em duas diferentes barreiras separadas pelo mesmo canal (Fig. 6). A porção amostrada da barreira situada a W do canal, no sentido da corrente litorânea (*downdrift*), corresponde a uma área sob intensa erosão, apresentando-se como um corpo delgado (< 30 m) caracterizado por depósitos de espraiamento (amostra DL-09 A) e sobrelavagem (amostra DL-09 B). Ademais, essa é uma região de intensa retração de linha de costa no sentido NE-SW, com intenso galgamento de depósitos arenosos para a região de retrobarreira (Silva & Vital 2019). Isso faz com que depósitos de planície de maré e mangues sejam recobertos por sedimentos arenosos de praia (Fig. 6).

Já a porção amostrada da barreira situada a E do canal, sentido contrário à deriva litorânea (*updrift*), revela um ambiente em expansão sob forma de um

pontal arenoso que avança sobre o canal, constituindo-se especialmente por depósitos de espraiamento e dunas frontais embrionárias. Nessa barreira, as amostras foram retiradas na região de estirâncio em sua face voltada para o oceano (DL-10 A), bem como na face voltada para a laguna (DL-10 B) (Fig. 6).

Os depósitos localizados na zona de estirâncio apresentaram granulometria majoritariamente composta por areia fina (51 a 62%) a média (34 a 46%) (Tabela 1), com baixa quantidade de bioclastos. O teor de matéria orgânica variou entre 0,086 e 0,34% e o teor de carbonato de cálcio ficou de 2,52 a 3,52% (Tabela 1). Pequenas trincheiras abertas nesta região evidenciam estratos aparentemente paralelos horizontais ou suavemente inclinados para o mar com material de coloração mais escura, indicando uma concentração maior de minerais pesados (Fig. 6). Esse tipo de acamamento fora descrito por Caldas et al. (2006) na região do esporão de Galinhos (a E da área de estudo) como estratificações cruzadas de baixo ângulo do tipo *swash*.

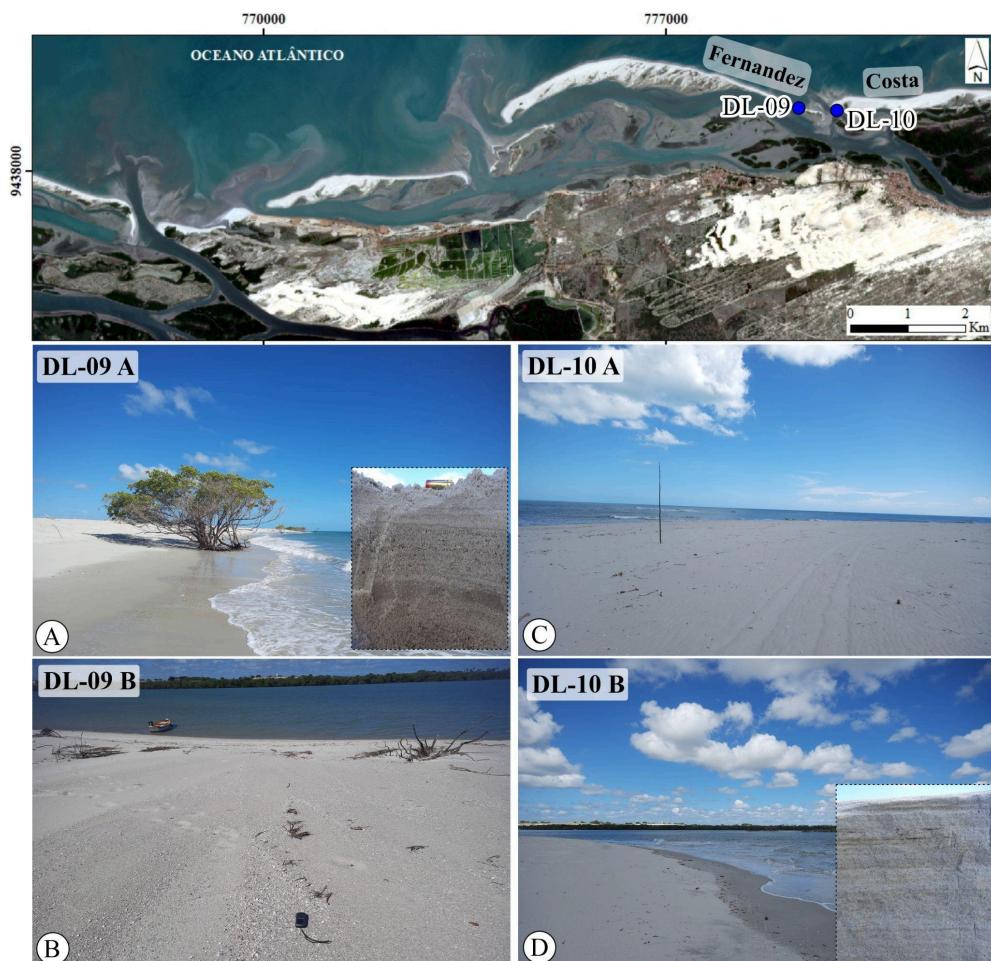


Figura 6: Localização e características do local de coleta das amostras DL-09 e DL-10. A – Visão geral da área onde foi coletada a amostra DL-09A, destaca-se a presença de uma árvore de mangue (*Laguncularia racemosa*) remanescente agora situada em ambiente de praia devido a sobreposição da barreira à depósitos de planície de maré e mangue, no canto inferior direito observa-se um corte vertical realizado na região de estirâncio. B - Visão geral da região de coleta da amostra DL-09B, com muitos bioclastos depositado em formas de leques pela sobrelavagem; C – Panorama da região onde foi realizada a coleta da amostra DL-10A, na face da barreira voltada para o oceano; D – Visão da região de coleta da amostra DL-10B, no canto inferior direito destaca-se um corte vertical no sedimento apresentando camadas de sedimento mais escuro, indicando uma maior presença de minerais pesados.

Bezerra et al. (2009) que descreve esse tipo de depósito de modo generalizado, sem distinguir as diferentes fácies, os caracteriza como areias inconsolidadas quartzosas com granulometria variando de fina até muito grossa, sendo rica ($> 5\%$) em bioclastos e, algumas vezes, em minerais pesados.

Os depósitos de sobrelavagem, que caracterizam a região na qual as ondas avançam por cima da barreira, depositando conchas e fragmentos de concha na região por trás da ilha, formando leques de sobrelavagem (Fig. 6), constituem a fácie sedimentar texturalmente mais grossa presentes nas ilhas barreiras da região. Deste modo, compõe-se predominantemente por areia grossa (26%) a média (51%), com areia muito grossa e fina subordinada. Verificou-se um teor de carbonato de cálcio de 7,35% e 0,11% de matéria orgânica (Tabela 1). De acordo com descrições desse tipo de depósito realizadas por Caldas (2002), estes são formados através da sobrelavagem da barreira de areia, sendo constituídos por areia cinza média a grossa, moderadamente selecionada.

Deltas de Maré

As amostras DL-03 e DL-06 foram coletadas em regiões de deltas de maré de vazante e enchente, respectivamente (Fig. 7).

O depósito de delta de maré de vazante, localizado na entrada do canal entre a ilha barreira Corta Cachorro e o pontal arenoso Soledade, possui uma forma alongada, na direção N-NE/S-SW, e exibe características como marcas onduladas subaquáticas em algumas partes de sua exposição (Fig. 7). Compõe-se predominantemente areia fina (72%) com areia média subordinada (20%), e poucos fragmentos de concha. O teor de carbonato de cálcio para essa amostra foi de 4,41%, enquanto o teor de matéria orgânica foi de 0,56% (Tabela 1).

Já o depósito de delta de maré de enchente, localizado próximo à abertura do canal entre a ilha Fernandez e o pontal arenoso Costa, revela um ambiente significativamente mais energético, onde foram observados clastos de lama com dimensões da ordem de decímetros, áreas com concentração de conchas completas, fragmentos de conchas, galhos e raízes de plantas e marcas onduladas subaquosas (Fig. 7). A granulometria varia de areia fina a muito grossa, embora prevaleça a fração areia média ($\approx 50\%$) (Tabela 1). O teor de matéria orgânica verificado para este depósito foi de 0,61%, enquanto o teor de carbonato de cálcio perfez 5,92% (Tabela 1).

De acordo com Costa Neto (2009), na foz do Complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré, assim como na área de estudo, se desenvolvem deltas de maré de vazante formados por depósitos de argila e areia fina, de composição quartzosa e biodetrítica, mal selecionadas, que afloram durante a maré baixa. As características sedimentológicas podem apresentar uma

leve diferença de uma região para outra devido às condições energéticas que atuam sobre cada ambiente.

Esses deltas constituem depósitos efêmeros, com modificações constantes na sua forma em função da variação das correntes de maré, sendo construídos e retrabalhados em um curto espaço de tempo e dessa forma, podem não ficar registrados no pacote sedimentar.

4.3 Testemunhos

Os testemunhos estudados foram coletados em ambientes de praia/barreira, manguezal e em um segmento de ilha barreira localizada em uma posição de antiga linha de costa, atualmente mais próximo ao continente. O tamanho dos testemunhos analisados em sua maioria foi em torno de 1 a 1,50 m, apresentando recuperação mínima de 0,85 e máxima 3,00 m, não obtendo informação de maiores profundidades.

Neles foi possível identificar 4 associações de fácies, sendo cada uma relacionada com diferentes elementos deposicionais do sistema de barreiras arenosas (canal de maré, planície de maré, praia/barreira e pós-praia). Abaixo, estão descritas as características e interpretações de cada associação de fácies.

A Associação de Fácies 1 (AF1) foi identificada na base do testemunho CM 1, correspondendo a uma camada de cerca de 80 cm de espessura, composta principalmente por sedimentos de granulometria areia grossa contendo algumas intercalações com areia fina, variando de tonalidades entre cinza oliva claro e cinza escuro, cuja composição inclui, além do quartzo, fragmentos de bioclastos, e minerais como hornblenda, ilmenita, epídoto, estaurolita e turmalina. A areia demonstra uma seleção que varia de pobre a moderada, apresentando grãos angulosos e baixa esfericidade. Os teores de carbonato de cálcio encontrados variam de 0,69% a 28,39%, enquanto os teores de matéria orgânica variam de 9,18% a 10,65%.

Sedimentos com características semelhantes foram observados em amostras coletadas nos canais de maré descritas anteriormente. Nesses locais, a granulometria varia de areia grossa a média, com uma grande presença de conchas e fragmentos de conchas nas áreas mais próximas à desembocadura do canal. Em contraste, nas áreas mais internas e próximas às margens, a granulometria é predominantemente de areia média a fina. De maneira similar, Costa Neto (2009) descreve a ocorrência de classes de areia mais grossa no centro dos canais de maré em Galinhos, refletindo a alta energia das correntes de maré nessa região central, contrastando com classes de areia mais fina encontradas nas áreas próximas às margens, indicando uma menor energia das correntes nesses locais. Deste modo, foi interpretado que a AF1 representa depósitos de canais de maré principais (*inlet*).

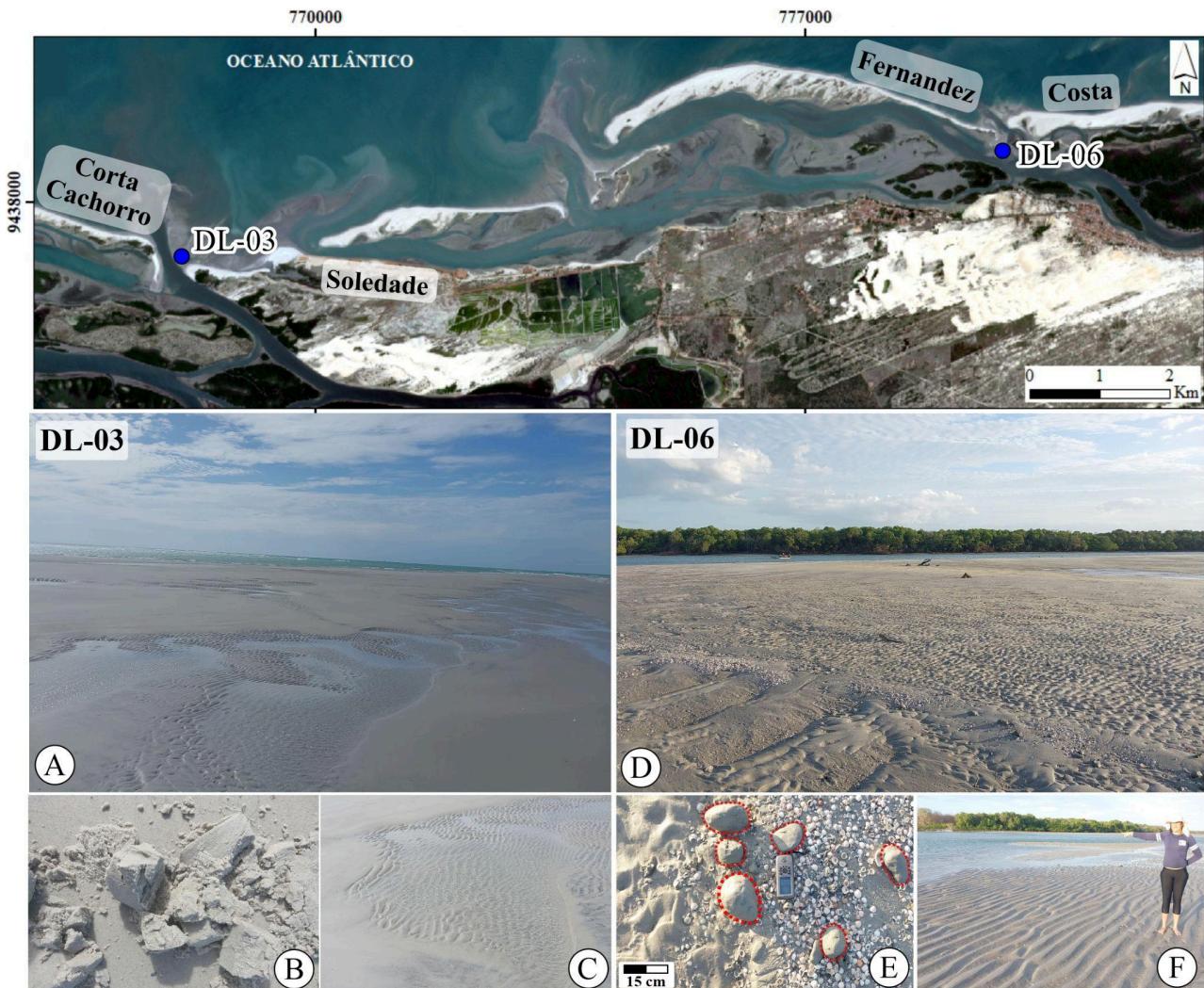


Figura 7: Localização e características do local de coleta das amostras DL-03 e DL-06. A – Visão geral da região onde foi coletada a amostra DL-03; B - Detalhe do sedimento amostrado em DL-03; C – Marcas onduladas subaquosas na área do delta de maré de vazante (DL-03); D – Vista da área de coleta da amostra DL-06; E – Clastos de lama (círculos vermelhos) e bioclastos encontrados na borda E do local de coleta de DL-06; F – Marcas onduladas subaquosas com espaçamento decímetrico entre as cristas encontradas no delta de maré de enchente (DL-06).

A Associação de Fácies 2 (AF2) é encontrada na maioria dos testemunhos. Nos testemunhos ARM, CM 2, CM 3 e SM-10 ela constitui todo o intervalo amostrado, entre 1,3 e 3 m. Enquanto nos testemunhos ARPrI, CPrI 1 e SM-06 essa associação ocorre na base, em camadas que variam aproximadamente de 0,3 a 0,85 m de espessura, e no topo do testemunho CM 1 a associação ocorre em cerca de 0,65 m de sedimento. A AF2 exibe uma composição predominantemente de areia muito fina a fina, com tonalidades variando de cinza claro amarelado/esverdeado a cinza escuro, ocasionalmente intercalada com porções mais lamosas (compreendendo de 8% a 25% da fração silte+argila), e por vezes contendo níveis com fragmentos de conchas e intervalos com areia média. Esta associação de fácies contém matéria orgânica e restos vegetais. A seleção dos sedimentos varia de pobre a bem selecionada, com grãos que vão de angulosos a subarredondados e uma esfericidade que pode variar de baixa a alta. É composta principalmente por quartzo, com a presença de outros minerais como monazita, ilmenita, epídoto, K-feldspato, muscovita, turmalina, hornblenda, e

estaurolita, além de bioclastos, com até 18%. Os teores de carbonato de cálcio variam entre 0,60% e 41,61%, sendo que os maiores teores estão associados à presença de sedimentos mais finos (com maior quantidade de silte). Em contrapartida, os teores de matéria orgânica são mais baixos, geralmente abaixo de 15%, variando entre 0,68% e 28,32%.

Características semelhantes foram identificadas nos sedimentos das amostras de superfície coletadas nas regiões de planície de maré, que apresentam areia média a muito fina, com uma quantidade associada de silte (entre 5% e 22%), frequentemente com presença de conchas e fragmentos de conchas. Adicionalmente, de acordo com Bezerra et al. (2009), depósitos de planície de maré são constituídos por areia fina a silte, pobremente selecionada e alto teor de carbonato de cálcio e matéria orgânica. Estas evidências levaram a interpretar que a Associação de Fácies 2 se correlaciona a áreas de planície de maré.

A Associação de Fácies 3 (AF3), descrita em toda a extensão do testemunho CPrI 2 (1,45 m), no topo dos

testemunhos ARPrI, CPrI 1 e SM-06 (0,50 a 1,10m de espessura), e na porção intermediária do testemunho CM1 (0,65 m), apresenta uma variação granulométrica que vai desde areia muito fina até grossa, com cores que variam entre cinza claro, escuro, marrom amarelado e alaranjado. A seleção dos grãos é pobre a muito bem selecionada, com grãos que podem ser angulosos a subarredondados e uma esfericidade que varia de baixa a alta. Nessa associação são descritos intervalos com intercalações de sedimentos mais finos com mais grossos, porções maciças com granulometria predominante e diferentes sobreposições de camadas mais finas e mais grossas, o que pode indicar uma alternância da energia deposicional. Em alguns intervalos são observadas laminações plano paralelas marcadas pela alternância de cor no sedimento. A composição é principalmente de quartzo, com a presença de alguns fragmentos de bioclastos (em até 20%) e outros minerais terrígenos (com um máximo de 8%), como monazita, epídoto, turmalina, K-feldspato, ilmenita, estaurolita, muscovita e granada. Os teores de carbonato de cálcio variaram entre 0,71% e 28,39%, enquanto os teores de matéria orgânica variaram de 0,71% a 19,52%.

Nas amostras de superfície analisadas anteriormente, depósitos de praia/barreira apresentaram uma granulometria que varia de areia média a fina, com a presença de algumas conchas e fragmentos de conchas, e pequenas camadas com material de coloração mais escura, correspondente a intervalos com uma maior concentração de minerais pesados. Devido a essas características a Associação de Fácies 4 foi relacionada ambiente de praia/barreira.

A Associação de Fácies 4 (AF4) descrita no testemunho CPrI 3, exibe uma composição de areia fina a grossa, com coloração marrom acinzentado a alaranjado, que grada para areia com granulometria que varia de fina a média, cinza a marrom amarelado, predominantemente quartzosa (com mais de 90% de quartzo), com aproximadamente 4% de outros minerais (como epídoto, monazita, K-feldspato, estaurolita, turmalina, magnetita e ilmenita), além disso, essa associação contém intervalos com cerca de 10 a 14% de fragmentos de bioclastos e presença de restos vegetais. A seleção dos grãos é pobre a moderada nas porções mais grossas e moderada a bem selecionada nos sedimentos mais finos, com grãos subangulares a subarredondados e uma esfericidade que varia de baixa a alta. Foram registrados baixos teores de carbonato de cálcio (entre 0,35% e 10,02%) e teores de matéria orgânica entre 2,86% e 8,25%.

Na região são descritos sedimentos com características semelhantes, em uma amostra de superfície coletada na região por trás de uma ilha barreira se destacava a presença de leques de sobrelavagem, com várias conchas e fragmentos de conchas associados, composta principalmente por areia média, com uma proporção menor de areia grossa e fina. Sedimentos mais finos são mencionados por

Bezerra (2009) para depósitos eólicos, compostos por areia fina a média, predominantemente de quartzo, e ocasionalmente fragmentos de conchas. Os grãos são bem selecionados, arredondados a subarredondados, e uma forma que varia de esférica a subesférica.

Com base nessas semelhanças, a Associação de Fácies 4 foi interpretada como representante da região de pós-praia, onde geralmente encontram-se sedimentos provenientes de processos de sobrelavagem da ilha, que deposita sedimentos mais grossos, com grande quantidade de fragmentos de conchas, além de sedimentos mais finos provenientes do transporte eólico.

4.4 Evolução

Os sistemas de ilhas barreiras constituem um ambiente altamente dinâmico, de modo que em uma escala de décadas, é possível observar a evolução de seus constituintes, em função da incessante ação das ondas que conduz a migração de pontais, retração da linha de costa e a abertura/fechamento de canais de maré. Os testemunhos analisados conseguem representar essa evolução do sistema, uma vez que essas mudanças de curto prazo estão documentadas nas camadas mais superficiais do registro sedimentar.

Os testemunhos ARPrI e CPrI 1, extraídos em 2018 em ambiente de praia, apresentam em sua base a associação de fácies AF2, representativa de depósitos de planície de maré, indicando que ambos os locais já constituíram regiões de retrobarreira (protegida da ação do mar aberto), sendo posteriormente recoberto por sedimentos de praia da associação de fácies AF3. Essa sucessão caracteriza o processo de retração de uma ilha barreira que ocorre nessa porção situada no sentido contrário ao fluxo da deriva litorânea (*updrift*) (Silva & Vital 2019). Para o testemunho ARPrI, esse fenômeno pode ser visualizado através de imagens de satélite do período 2005-2018 (Fig. 8).

As variações texturais presentes no testemunho CPrI 2 são interpretadas como pertencentes a associação de fácies AF3, caracterizando que no intervalo recuperado a deposição dos sedimentos ocorreu na zona de estirâncio do sistema praia/barreira. Esse aspecto é condizente ao observado pelas imagens de satélite, as quais revelam um ambiente praial de ilha barreira estabelecido ao longo dos anos que precederam a amostragem (Fig. 9).

O testemunho CPrI 3, coletado na face da ilha barreira voltada para o continente, apresenta a associação de fácies AF4, que representa depósitos desenvolvidos na região de pós-praia. Essa associação apresenta o registro do desenvolvimento de depósitos provenientes do transporte de água e sedimentos da praia sobre a barreira, pela ação de ondas de maior energia, gerando leques de sobrelavagem, observados na imagem de satélite do ano de 2003, juntamente com a deposição de areia transportada por processos eólicos (Fig. 9).

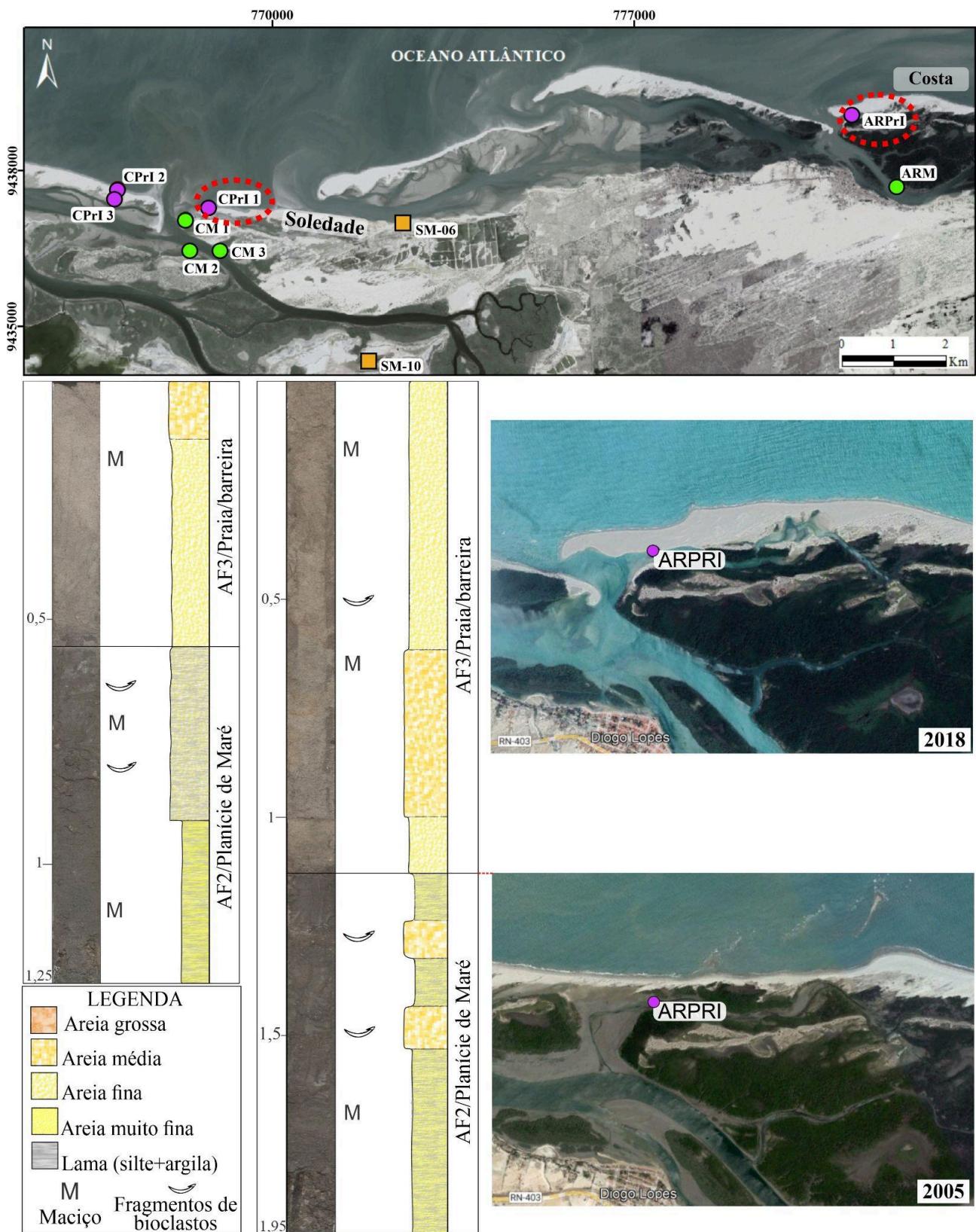


Figura 8: Evolução dos testemunhos ARPRI e CPrI 1, com a presença de depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos de ilha barreira/portal arenoso.

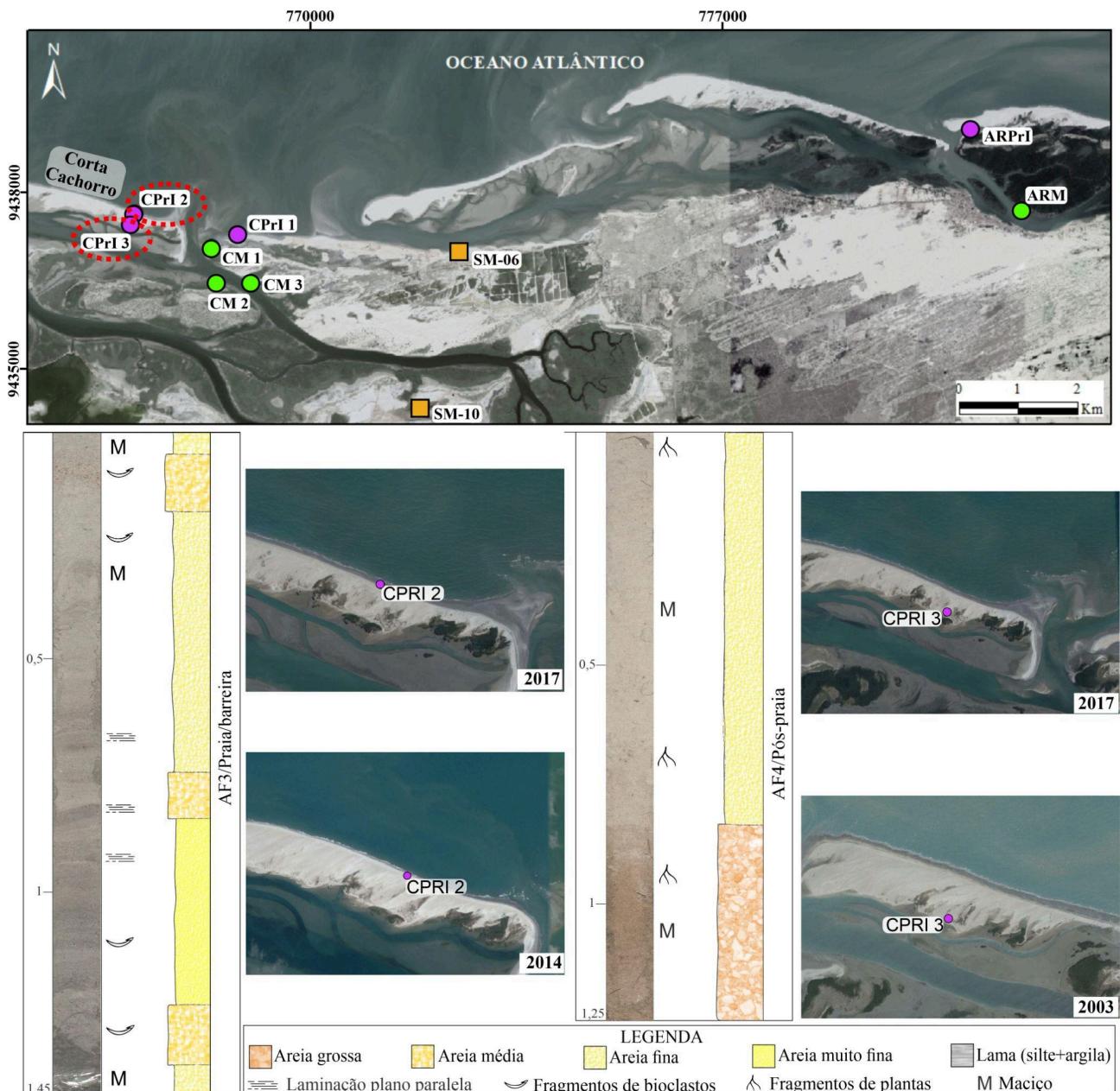


Figura 9: Evolução dos testemunhos CPRI 2, com depósito de ilha barreira/pontal arenoso preservado; e CPRI 3, com a associação de fácies de pós-praia, representada por sedimentos de sobrelavagem na base, sobreposto por areia eólica.

Em um contexto diferente, o testemunho CM 1, retirados em ambiente de manguezal/planície de maré, em sua base apresenta a associação de fácies AF1, indicando que aquele local inicialmente era um canal de maré, sobreposto pela associação de fácies AF3, com depósito de praia, sendo recoberto posteriormente por sedimentos de planície de maré, da associação de fácies AF2. A sucessão descreve o processo de abertura de um canal de maré, no qual o local amostrado foi exposto à energia das ondas, tendo retornado para uma condição mais protegida, no topo da sequência amostrada. Essa evolução pode ser visualizada nas imagens de satélite do período 2008-2017 (Fig. 10).

Na região, é comum observar variações nas feições ao longo do tempo. Um exemplo documentado é a abertura natural do canal Barra do Fernandez,

conforme relatado por Vital et al. (2008), ocorrida em 1977 no sistema de barreira da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Ponta do Tubarão (RDSPT). Isso resultou na formação de um pontal e de uma ilha barreira denominada "ilha Ponta do Tubarão". Outro exemplo recente dessa dinâmica foi a abertura do Canal do Arrombado em 2006, que separou as praias de Soledade e Corta Cachorro, convertendo esta última em uma ilha barreira (Souto et al. 2006). No mesmo ano, ocorreu um evento semelhante no canal de maré chamado Barra Nova, que separou o pontal arenoso que ligava Fernandez e Minhoto por aproximadamente um ano e meio. Após esse período, as condições hidrodinâmicas, juntamente com o aporte de sedimentos, resultaram no fechamento do canal e, consequentemente, na reincorporação da ilha pelo pontal (Vital et al. 2008).

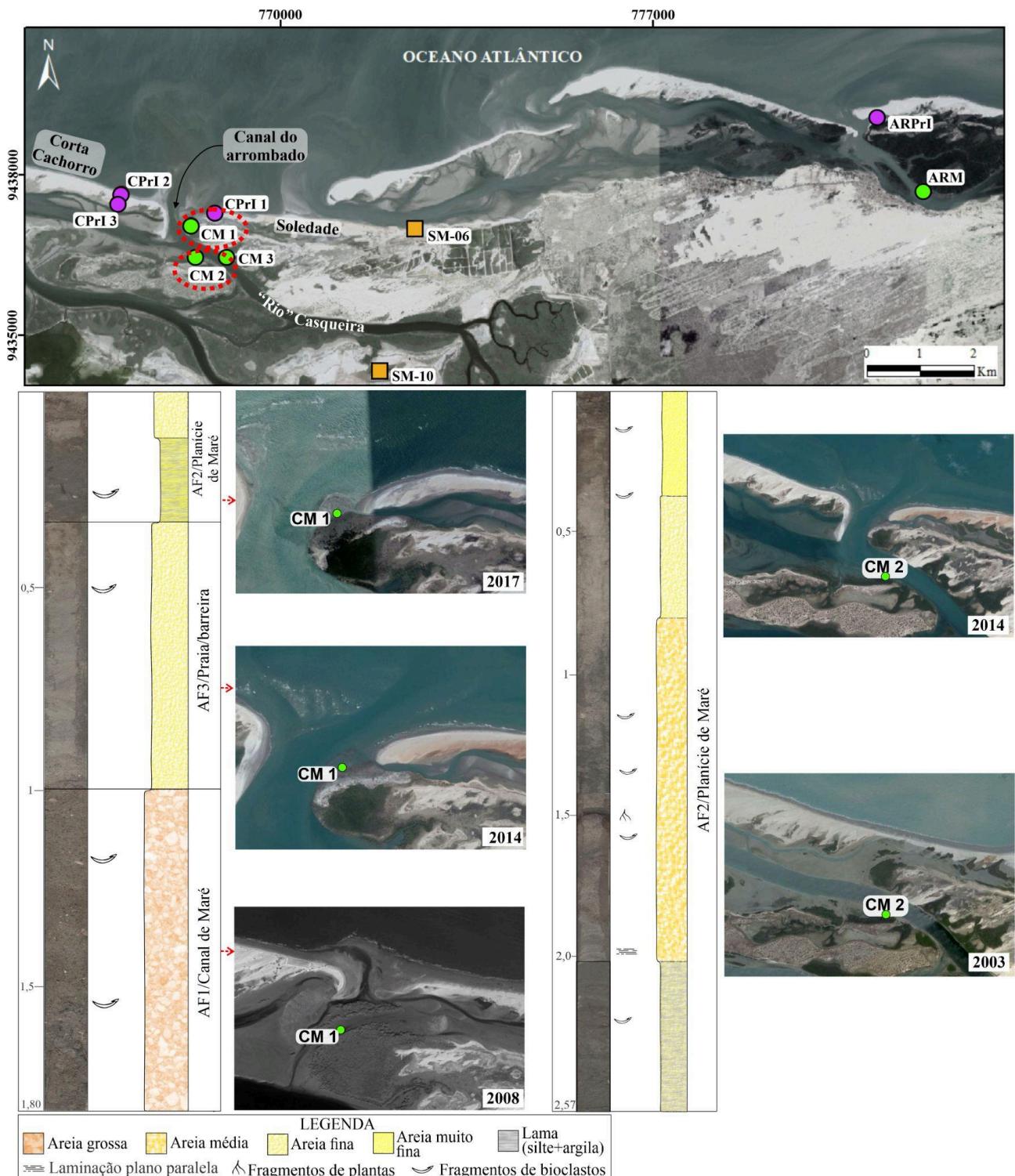


Figura 10: Evolução dos testemunhos CM 1, com a presença da depósitos de planície de maré na base, sobreposto por depósitos de ilha barreira/pontal arenoso e no topo depósitos de uma região mais protegida; e CM 2, com a presença da depósitos de planície de maré.

No testemunho CM 2, os sedimentos descritos foram interpretados como correspondentes à associação de fácies AF2, de depósitos de planície de maré. A sequência registrada mostra uma variação granulométrica significante, que pode ser relacionada à variação energética dos processos atuantes, que desempenham um papel crucial na dinâmica de transporte e deposição. Nas imagens de satélite observa-se que o local se encontrava protegido do mar

aberto, em um ambiente de menor energia, sendo posteriormente alterado com a abertura do canal de maré, que modificou a dinâmica no ambiente (Fig. 10).

Os testemunhos ARM e CM 3 apresentam uma sedimentação mais homogênea e contínua com representação da associação de fácies AF2, correspondente a depósitos de planície de maré (Fig. 11). Nesses testemunhos, nota-se uma predominância

de deposição de sedimentos arenosos associados a estratos com teor mais elevado de silte e argila. Flutuações no fluxo das marés nos canais, acompanhadas de variações de energia ao longo de

diferentes estágios, contribuem para os diversos processos de deposição. Nas imagens de satélite o testemunho ARM representa o ambiente de planície de maré observado nos anos anteriores a coleta (Fig. 11).

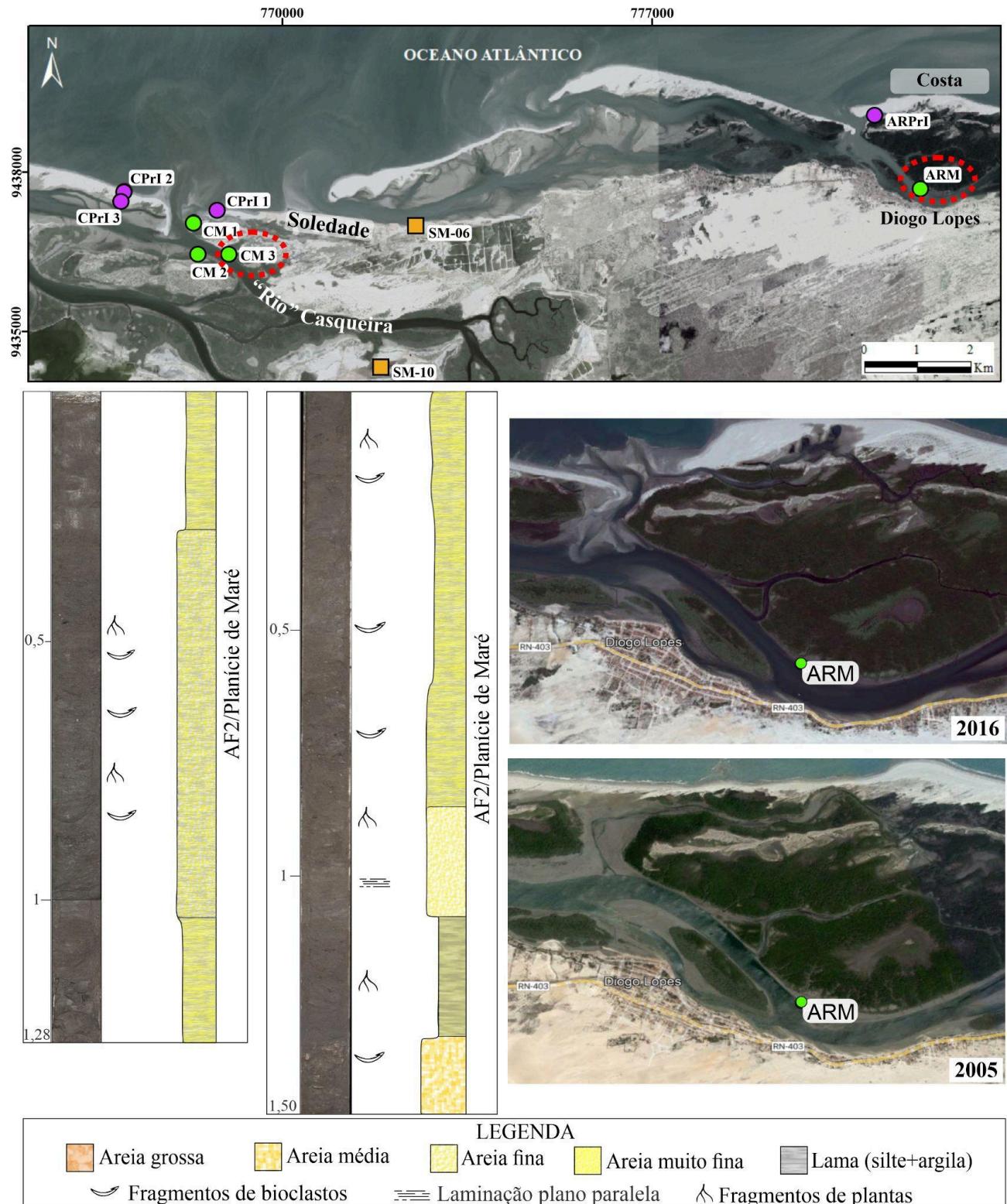


Figura 11: Evolução dos testemunhos ARM e CM3, com a preservação de depósitos de planície de maré.

Testemunhos descritos no trabalho de Silva (1991) (SM-6 e SM-10) estão em regiões atualmente afastados da costa, mas no passado poderiam estar em uma

posição e dinâmica semelhante ao que se observa nos testemunhos atuais. Observa-se uma correspondência nas características apresentadas pelo testemunho SM-6

(Fig. 12), com os testemunhos ARPrI e CPrI 1, neles observa-se o desenvolvimento de sequências verticais semelhantes, com depósitos de sedimentos finos, entre a base e a porção intermediária, caracterizando 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/barreira (AF3).

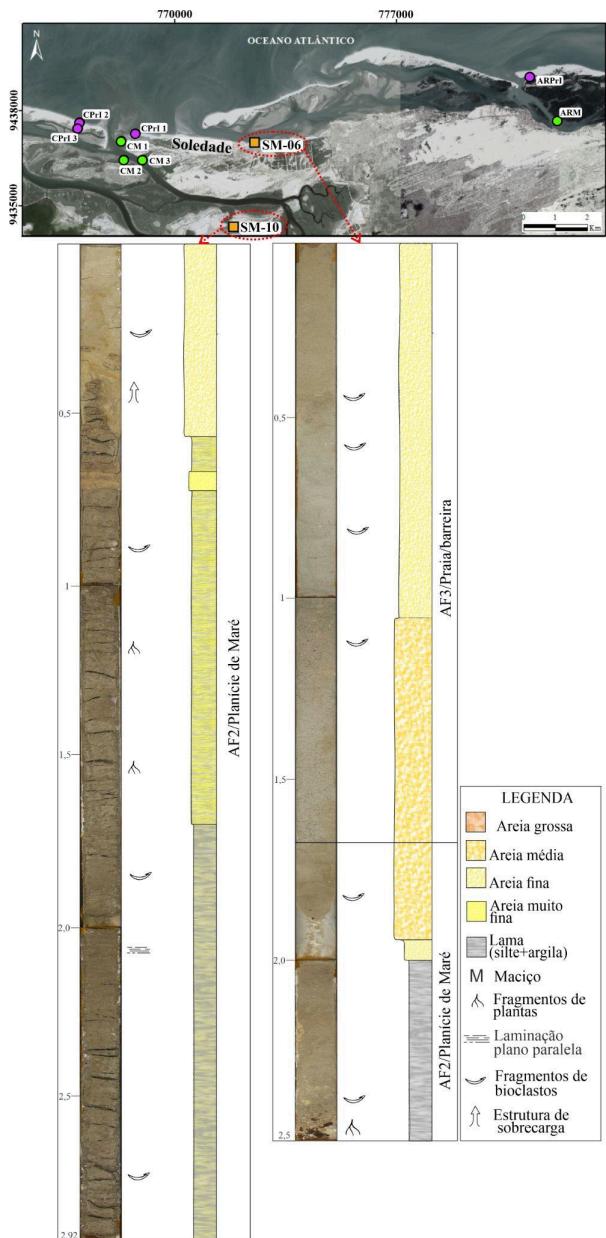


Figura 12: Testemunhos SM-06, com depósitos de planície de maré e praia/ilha barreira e SM-10 com depósitos de planície de maré.

O testemunho SM-10 (Fig. 12), retirado próximo a um canal secundário formado pelo rompimento do canal principal do Rio da Conceição (Silva 1991), assim como os testemunhos CM e ARM, apresenta sedimentos representantes de depósitos de planície de maré (AF2), com sedimentos finos, presença de matéria orgânica e fragmentos de bioclastos.

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 sequências e depósitos similares, dessa forma, podendo ser aplicado para estudos de reservatórios análogos de óleo e gás.

5. Conclusões

Esse trabalho contribuiu para uma melhor compreensão morfológica, sedimentar e estratigráfica dos constituintes dos sistemas de ilhas barreiras do litoral setentrional do RN. Nesse sentido, cabe destacar o ganho trazido pelo levantamento batimétrico do canal de maré "Rio" Tubarão, o qual passou a ser compreendido como um ambiente pouco profundo (média < 3m), com morfologia do leito relativamente plana, e onde a ocorrência de micro-ondulações e dunas subaquosas dá-se tanto nas proximidades da desembocadura do canal quanto em regiões com maior o aporte de sedimento eólico (e.g. Minhoto).

Em relação aos constituintes dos sistemas de ilhas barreiras, observa-se que os depósitos são predominantemente arenosos, mesmo para aqueles situados região de retrobarreira, onde era esperada uma maior presença de frações mais finas (silt e argila). Essa elevada relação areia-lama nos sedimentos, indica um ambiente significativamente energético. Nos canais de maré as variações granulométricas ocorreram conforme o esperado: em canais principais e suas desembocaduras foram encontradas frações mais grossas (areia média a grossa com cascalho), enquanto os canais de maré secundário apresentaram menor granulometria (areia fina a média). A sedimentologia dos canais secundários mostrou-se muito semelhante à apresentada pelos depósitos de planície de maré, podendo ser diferenciados pela variação na quantidade de silte, presente em maior quantidade nos sedimentos deste último.

Os resultados obtidos com a descrição dos depósitos de superfície, permitiram melhor interpretar o pacote estratigráfico contido nos testemunhos, bem como possibilitou a identificação de 4 associações de fácies correspondentes aos elementos deposicionais: planície de maré, canal de maré, praia/barreira e pós-praia. Ademais, a análise da sequência sedimentar dos testemunhos aliada à identificação das transformações ambientais registradas em imagens de satélite permitiu uma melhor correlação entre a sucessão estratigráfica e a evolução dos elementos deposicionais daquele sistema de ilhas barreiras. A exemplo disso destaca-se o registro do episódio de preenchimento de canal de maré em função da migração de um pontal arenoso, caracterizado pela passagem de pacote sedimentar predominante mais grosso e rico em bioclastos, para depósitos de areia média e fina típicos da região de estirâncio.

Visto que se trata de uma região bastante mutável com um dinâmica intensa associada, a sequência de sedimentos depositados reflete a transição das feições, em decorrência da ação de ondas e correntes litorâneas que contribuem para a migração de pontais, retração da

linha de costa e aberturas e fechamentos dos canais de maré. Apesar disso, as mudanças que ocorrem são cíclicas, relacionadas à migração lateral de feições, o que poderá refletir no desenvolvimento a longo prazo de sequências com alternância entre dois ou mais depósitos.

Agradecimentos

Aos financiadores: FUNPEC/UFRN/CAMPO SERRA 26209 e CNPQ (PQ 315742/2020-8); à CAPES pela bolsa de mestrado; ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) pelo apoio científico e financeiro; ao Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGERMMA) pela disponibilização dos dados, apoio científico e formação profissional; ao Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geologia da UFRN e ao Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos (NUPPRAR) pela disponibilização de equipamentos, instalações e suporte científico.

Declaração de autoria

D. R. C. R.: Conceptualization, Data Curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Writing – Original Draft Preparation, Writing – Review & Editing

H. V.: Conceptualization, Data Curation, Funding Acquisition, Investigation, Project Administration, Resources, Supervision, Writing – Review & Editing

F. E. S.: Conceptualization, Investigation, Methodology, Visualization, Writing – Review & Editing

Referências

- ALVES, A. L., AMARO, V. E., VITAL, H. 2003. Application Of Remote Sensing For Monitoring And evaluation Of Coastal Morphodynamic On The Northeastern Coast Of Brazil: The Açu River Mouth Example. *Journal of Coastal Research*, 35:279-283.
- ASHLEY, G.M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Research*, 60:160–172.
- 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.
- CHANG, T.S.; FLEMMING, B.W.; TILCH, E. 2006. Late Holocene stratigraphic evolution of a back-barrier tidal basin in the East Frisian Wadden Sea, southern North Sea: transgressive deposition and its preservation potential. *Facies* 52:329–340.
- CHAVES, M. S., VITAL, H., SILVEIRA, I. M., SANTOS, D. A. S. 2006. Beach Morphodynamics of the Serra Oil Field (NE, Brazil). *Journal of Coastal Research*, 39:594–597.
- 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. 2009. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 270 p.
- DURÁN, R., GUILLEN, 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.
- ELKO, N. A.; DAVIS JR., R. A. 2006. Morphologic evolution of similar barrier islands with different coastal management. *Journal of Coastal Research, Proceedings of the 8th International Coastal Symposium*, 39:127–131.
- 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*, 87:691–702.
- 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.
- HAYES, M.O. 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Leatherman, S.P. (ed.), *Barrier Islands: From the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*, 1–29.
- HAYES, M.; FITZGERALD, D. 2013. Origin, Evolution, and Classification of Tidal Inlets. *Journal of Coastal Research*, 69:14–33.
- MARTIN, L., FLEXOR, J. M., SUGUIO, K. 1995. Vibrotestemunhador leve: construção, utilização e potencialidades. *Revista do Instituto Geológico*, 16(1-2): 59–66.
- MORTON, R. A. 1979. Temporal and spatial variations in shoreline changes, Texas Gulf Coast: *Journal of Sedimentary Petrology*, 49:1101–1111.
- NIMER, E. 1989. Climatologia do Brasil. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, 421p.
- NICHOLS, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*, Wiley-Blackwell, 432p.
- OTVOS, E. G. 2012. Coastal barriers — Nomenclature, processes, and classification issues. *Geomorphology*, 139–140:39–52.
- PILKEY, O. H. 2006. Comparison of Tropical Barrier Island Chains on Leading Edge (Colombia) and Trailing Edge (Brazil) Coasts. *Journal of Coastal Research*, 39:94–96.
- REINECK, H., E., SINGH, I.B. 1980. *Depositional sedimentary environments*. Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- RIOS, V. P. L., AMARO, V. E. 2012. Caracterização dos depósitos sedimentares Holocénicos no sistema de ilhas barreiras do estuário Diogo Lopes, litoral setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista de Geologia*, 25:55 - 69.
- RIOS, V. P. L., AMARO, V. E., VIEIRA, M. M., MATOS, M. F. A., PRUDÊNCIO, M. C., C MARA, M. 2016. Influência Neotectônica na Morfologia do Sistema de Ilhas Barreiras, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17(3):399–416.
- RÖBER, V., KOTZOLLIK, O., STATTEGGER, K., VITAL, H. 2005. Dynamics of the complex coastal system at Galinhos (RN), NE-Brazil. *Meyniana*, 57:133–155.
- SILVA, C.G. 1991. Holocene stratigraphy and evolution of the Açu river delta, Rio Grande do Norte state, northeastern Brazil. Tese de Doutorado. Duke University, Durham, North Carolina, United States, 359 p.
- 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*, 40:897–909.

- SILVEIRA, I.M. 2002. Estudo evolutivo das condições ambientais da região costeira do município de Guamaré - RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 172 p.
- SOUTO, M. V. S., GRIGIO, A. M., CASTRO, A. F., AMARO, V. E., VITAL, H. 2006. Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, City of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. *Journal of Coastal Research*, 39:1618-1621.
- STUTZ, M.; PILKEY, O. H. 2011. Open-Ocean Barrier Islands: Global Influence of Climatic, Oceanographic, and Depositional Settings. *Journal of Coastal Research*, 27:207-222.
- VAN HETEREN, S. 2014. Barrier systems. In: MASSELINK, G.; GEHRELS, W. R. (eds.), *Coastal Environments and Global Change*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Blackwell, 194–226p.
- VASCONCELOS, E. P., LIMA NETO, F. F., ROOS, S. 1990. Unidades de correlação da formação Açu – Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36. Anais. Natal: SBG/NE, 1:227-240.
- VITAL H. 2009. The Mesotidal Barriers of Rio Grande do Norte. In: DILLENBURG, S. R., HESP, P. A. (eds) *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer, Berlin, 289-324p.
- 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 Mesotidal 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., 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., SANTOS NETO, F., PLÁCIDO JUNIOR, J.S. 2008. Morphodynamic of a Tropical Tidal Inlet: case study on the Rio Grande do Norte coast, Northeast Brazil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 8:113-123.
- 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., SILVEIRA, I.M.; TABOSA, W.F.; LIMA, Z.M.C.; LIMA FILHO, F.P.; SOUZA, F.E.S.; CHAVES, M.S.; Pimenta, F.M.; GOMES, M.P. 2016. Beaches of Rio Grande do Norte. In: SHORT, A. D., KLEIN, A. H. F. (eds). *Brazilian Beach Systems*. Springer International Publishing, Suíça, 17:1-608.
- VITAL, H., SILEVIRA, I. M., LIMA, Z. M. C., TABOSA, W. F., AQUINO DA SILVA, A. G., GOMES, M. P. G., CHAVES, M. S., SOUZA, F. E. S. 2018. Panorama da Erosão Costeira no Brasil: Rio Grande do Norte. 289-326. In: MUEHE, D. (org.). 2018. *PANORAMA DA EROSÃO COSTEIRA NO BRASIL*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 759p.

¹Recebido 29 de novembro de 2023
Aceito 09 de setembro de 2024