



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

GEOMORFOLOGIA DA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA ADJACENTE AO DELTA DO RIO PARNAÍBA (PI - MA)

Autora:

Sarah Alves dos Santos

Orientadora:

Profa. Dra. Helenice Vital

Dissertação nº 284/PPGG

Janeiro de 2023

Natal/RN - Brasil

SARAH ALVES DOS SANTOS

**GEOMORFOLOGIA DA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA
ADJACENTE AO DELTA DO RIO PARNAÍBA (PI - MA)**

Dissertação apresentada em 30 de janeiro 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 Geofísica.

BANCA EXAMINADORA:

PROFa. DRa. HELENICE VITAL

Presidente e orientadora (PPGG-UFRN)

PROFa. DRa. MARY LUCIA DA SILVA

Membro Externo (ANM-UFOP)

PROF. DR. ALBERTO GARCIA DE FIGUEIREDO JR

Membro externo (UFF)

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

Santos, Sarah Alves dos.

Geomorfologia da plataforma continental brasileira adjacente ao Delta do rio Parnaíba (PI - MA) / Sarah Alves dos Santos. - 2023.

82f.: 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. Geofísica - Dissertação. 2. Plataforma continental nordeste - Dissertação. 3. Mapeamento marinho - Dissertação. 4. Feições submersas - Dissertação. 5. Batimetria monofeixe - Dissertação. I. Vital, Helenice. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 550.3

Este trabalho de pesquisa é dedicado aos meus pais Moisés e Francisca, os dois maiores incentivadores das realizações dos meus sonhos. Esta dissertação é a prova de que todo seu investimento e dedicação valeram a pena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me deu forças e coragem para conquistar os meus sonhos, um sonho tão distante que jamais imaginei alcançá-lo, sem Ele esse mestrado não seria possível.

Ao meu pai Moisés, minha mãe Francisca, meu irmão Laércio, minha cunhada Wilkarla, deixo a vocês toda a minha gratidão, vocês acreditaram em mim quando nem eu mesma acreditei, me deram forças, me apoiaram, me ajudaram a seguir, nunca me deixaram desistir, fizeram o impossível para que eu chegasse aonde eu cheguei, o meu muitíssimo obrigada a todos vocês.

Agradeço a Capes pela concessão da bolsa de mestrado; a Marinha do Brasil, através do BNDO, pela disponibilização dos dados batimétricos e sedimentológicos; a UFRN, através do laboratório GGEMMA pela disponibilização da infraestrutura necessária ao desenvolvimento deste trabalho. A pesquisa foi subsidiada pela CAPES e CNPq através dos projetos PQ CNPq 315742/2020-8, CAPES CSF-PVE 88881.068034/2014-01, CAPES-IODP 88887.123925/2015-00 e desenvolvida no âmbito do INCT AmbTropic II (465634/2014-1).

Agradeço imensamente a todos que estiveram presentes durante a construção dessa dissertação, em especial a minha orientadora, professora Helenice Vital, que me apoiou, dedicou parte do seu tempo para me ajudar e me proporcionou oportunidades incríveis ao longo desses anos de mestrado, e a todos os professores da pós-graduação que fizeram parte do meu trajeto durante esses anos. Sou imensamente grata, muito obrigada!

Deixo meus agradecimentos aos meus amigos do laboratório GGEMMA e aos amigos que conheci durante os embarques, foram bons momentos os que passamos juntos, a troca de conhecimentos, o companheirismo, a ajuda, as boas risadas, as viagens de campo que renderam muitas experiências e boas histórias para contar, certamente vocês influenciaram no desenvolver da minha pesquisa, muito obrigada!

Muito obrigada a todas as pessoas que de longe ou de perto contribuíram de alguma forma com o meu crescimento, torceram pelo meu sucesso, oraram por mim e me ajudaram, deixo meu agradecimento a cada um de vocês.

Muito obrigada a todos vocês!

“Palavras são, na minha não
tão humilde opinião, nossa
inesgotável fonte de magia...”

J.K. Rowling

RESUMO

O mapeamento das feições presentes nas plataformas continentais contribui para a interpretação adequada do ambiente oceânico, que pode ser usado para fins científicos, políticos e estratégicos, para apoio a gestão, para o desenvolvimento e preservação das áreas submersas em geral e para o futuro do nosso planeta. Esse estudo foi realizado na Margem Equatorial Brasileira, na plataforma continental brasileira adjacente ao Delta do rio Parnaíba (PI-MA) e teve como objetivo principal o mapeamento de feições geomorfológicas nesta região através do uso de dados hidroacústicos (batimetria monofeixe), apoiado por dados sedimentológicos, obtidos no âmbito do Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Marinha do Brasil - BNDO. Em laboratório, os dados hidroacústicos foram interpolados utilizando-se os métodos da krigagem e o da mínima curvatura, onde o método da krigagem se mostrou mais eficiente na visualização das feições presentes na área. A integração, análise e interpretação dos dados resultou em quatro mapas do substrato oceânico: batimétrico, declividade da superfície, direção da declividade, distribuição de amostras que podem ser utilizados como unidades relevantes (e.g, declividade, orientação, curvatura e terreno, sedimentos, entre outros). Desta forma foi possível identificar uma cobertura sedimentar desde areia fina a areia grossa, areia com biodetritos, conchas e cascalho, presença de lama e areia quartzosa, cujo relevo associado a diferentes feições submersas, tais como bancos arenosos, vales submarinos, bem como a presença de platôs, associados a afloramentos rochosos e bancos recifais; adicionalmente, lineamentos e paleovales na plataforma atual indicam o percurso que no passado o rio Parnaíba percorreu.

Palavras-chave: PLATAFORMA CONTINENTAL NORDESTE; MAPEAMENTO MARINHO, FEIÇÕES SUBMERSAS; BATIMETRIA MONOFEIXE.

ABSTRACT

The mapping of the features present on the continental shelves contributes to the proper interpretation of the oceanic environment, which can be used for scientific, political and strategic development, to support management, for preservation of submerged areas in general and for the future of the our planet. This study was carried out on the Brazilian Equatorial Margin, on the continental shelf adjacent to the Parnaíba River Delta (PI-MA) and had as its main objective the mapping of seabed features in this region through the use of hydroacoustic data (singlebeam bathymetry), supported by sedimentological data, obtained from the Brazilian Navy's National Oceanographic Data Bank - BNDO. In the laboratory, the hydroacoustic data were interpolated using the kriging and minimum curvature methods, where the kriging method proved to be more efficient in viewing the features present in the area. The integration, analysis and interpretation of data resulted in four maps of the ocean substrate: bathymetric, slope, aspect, and sediment sample distribution that can be used as relevant units (e.g., inclination, orientation, curvature and terrain, among others). In this way, it was possible to identify a sedimentary cover from fine sand to coarse sand, sand with biotritus, shells and gravel, presence of mud and quartz sand, whose relief is associated with different submerged features, such as sandy banks, submarine valleys, as well as the presence of plateaus, associated with rocky outcrops and reef banks; additionally, lineaments and paleovalleys on the current shelf indicate the path that the Parnaíba River took in the past.

Keywords: NORTHEAST CONTINENTAL SHELF; SEABED MAPPING; SINGLE BEAM BATHYMETRY

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Situação global de mapeamento dos oceanos áreas em verde e roxo indicam os locais já mapeados (NIPPON FOUNDATION-GEBCO SEABED 2030 PROJECT).	18
Figura 2: Bloco ilustrando a linha de costa, a plataforma continental e o talude continental (CAMPOS, 2021).	20
Figura 3: Localização da área de estudo (polígono vermelho). A plataforma continental é representada na cor azul claro (Modificado de VITAL et al., 2010).	21
Figura 4: Área de estudos localizada entre as isóbatas de -10 e -100 m de profundidade (Carta 21700, Marinha do Brasil, 2022).	22
Figura 5: Ambientes continentais, de transição e marinhos (Modificado de HAMBLIN e CHRISTIANSEN, 2012).	24
Figura 6: Arcabouço estrutural da bacia do Barreirinhas e da bacia do Parnaíba (Modificado por ALMEIDA, 2000).	27
Figura 7: Esquema de levantamento batimétrico monofeixe (NOAA, 2007).	30
Figura 8: Representação dos dados aleatórios, linhas de dados não paralelas e linhas de dados ortogonais (Modificado de Geosoft, 2022).	31
Figura 9: Esquema representativo da declividade de uma região (Modificado de Corrêa 1990 por Corrêa, 2022).	32
Figura 10: Representação de linhas perpendiculares as curvas de níveis (Modificado de Corrêa 1990 por Corrêa, 2022).	33
Figura 11: Norma para lançamento das profundidades (Centro de Hidrografia da Marinha).	35
Figura 12: Pontos de sondagem da área de estudo (Modificado da Carta náutica 21700, Marinha do Brasil).	36
Figura 13: Interpoladores utilizados: A) Aplicação do método da mínima curvatura; B) Aplicação do método da krigagem (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).	37
Figura 14: Mapa de batimetria (KG) indicando a presença de altos relevos (a,b,c) e baixos relevos (d) (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).	41

Figura 15: Mapa de declividade da superfície (slope, KG) indicando a presença de feições com alto declive (a,c) e setas indicando a presença de regiões com lineamento SO-NE (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).	42
Figura 16: Mapa de direção da declividade (KG) com setas indicando a direção preferencial do declive dos lineamentos (SO-NE) (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).	43
Figura 17: Mapa de distribuição das amostras e suas granulometrias (Modificado da carta náutica 21700 da Marinha do Brasil).	44
Figura 18: Mapa de amostras sobreposto ao mapa batimétrico (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).	45
Figura 19: Mapa de perfis batimétricos (1 a 10)	46
Figura 20: Perfil batimétrico 1 um indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.	47
Figura 21: Perfil batimétrico dois na plataforma média e sua geomorfologia.	48
Figura 22: Perfil batimétrico três indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.	49
Figura 23: Perfil batimétrico quatro indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.	49
Figura 24: Perfil batimétrico cinco indicando a presença da plataforma interna e sua geomorfologia.	50
Figura 25: Perfil batimétrico seis indicando a presença das plataformas interna, média e sua geomorfologia.	50
Figura 26: Perfil batimétrico sete indicando a presença das plataformas interna, média e sua geomorfologia.	51
Figura 27: Perfil batimétrico oito indicando a presença da plataforma interna e sua geomorfologia.	51
Figura 28: Perfil batimétrico nove indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.	52
Figura 29: Perfil batimétrico dez indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.	53

- Figura 30:** Mapa de localização dos canais (U) vales incisos (V) identificados ao longo das linhas sísmicas.....54
- Figura 31:** Mapa batimétrico mostrando a localização dos recifes regionais Manoel Luiz-1 e Alvaro Bank-2 (ocorrências de corais), Tarol Bank-3 (calcários algas tipo maerl) e as Margens do Cururupu-4 (ondas de areia quartzosa) adjacentes à costa (DIAS et al 2021).56
- Figura 32:** Perfil sísmico localizado sobre a bacia de barreirinhas revelando um canal em forma de U com estruturas internas mostrando acreção vertical na base, migração lateral da barra pontiaguda concordantemente acima do SU2, refletores caóticos em SU3 e camadas horizontais em SU4 (Adaptado de Aquino, 2015 e ANP, 2015).57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sedimentos do fundo marinho	38
--	-----------

LISTA DE SIGLAS

ASCII - Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação

BNDO - Banco Nacional de Dados Oceanográficos

CHM - Centro de Hidrografia da Marinha

DRP - Delta do Rio Parnaíba

E - Leste

E.G - Por exemplo

GGEMMA - Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

KM - Quilômetro

LEPLAC - Levantamento da Plataforma Continental Brasileira

LTG - Laboratório de Topografia e Geodesia

M - Metro

MA - Maranhão

MC - Mínima Curvatura

MDE - Modelo Digital de Elevação

N - Norte

NE - Nordeste

PI - Piauí

REVIZEE - Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva

RP - Rio Parnaíba

SE - Sudeste

SO - Sudoeste

UNCLOS - *United Nations Convention on the Law of the Sea*

USP - Universidade de São Paulo

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UTM - Universal Transversa de Mercator

KG - Krigagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1.Apresentação	18
1.2.Margem e Plataforma continental.....	19
1.3.Plataforma continental brasileira.....	19
1.4.Objetivos	20
1.5.Área de estudo.....	20
2. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA	24
2.1.Deltas	24
2.2.Aspectos Meteoceanográficos.....	25
2.3.Aspectos Geológicos.....	25
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1.Batimetria monofeixe.....	29
3.2.Interpolação dos dados.....	30
3.3.Modelo Digital de Elevação (MDE).....	31
4. MATERIAIS E METODOS.....	35
4.1.Dados batimétricos.....	35
4.2.Dados sedimentológicos.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1.Resultados.....	40
5.1.1.Mapas da plataforma continental adjacente ao Delta do Parnaíba	40
5.1.2.Sedimentologia.....	44
5.1.3.Perfis batimétricos	45
5.2.Discussões.....	53
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
7. REFERÊNCIAS	60

ANEXO**Artigo submetido: Revista Quaternary & Environmental Geosciences**

Geomorfologia da plataforma continental Nordeste adjacente ao delta do rio Parnaíba (PI – MA).....	68
--	-----------

The page features two vertical decorative borders. The left border is a light blue-grey strip with a pattern of dark blue-grey wavy lines. The right border is a similar strip, also with a pattern of dark blue-grey wavy lines. The central area of the page is white.

Introdução

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O presente trabalho teve como área de estudo a região em frente ao Delta do Rio Parnaíba (DRP), localizado na plataforma continental do Nordeste brasileiro. A partir da integração de dados hidroacústicos e sedimentológicos a plataforma em frente ao DRP foi caracterizada quanto a sua geomorfologia e cobertura sedimentar. O mapeamento do substrato marinho é a base fundamental para o conhecimento dos oceanos e seus habitats, para entender a dinâmica atuante e a distribuição sedimentar pretérita, bem como para a instalação de qualquer empreendimento *offshore* (SEABEDMAP, 2020). Entretanto, apesar de mais de dois terços da superfície do planeta terra se encontrar abaixo do nível do mar (VITAL *et al.*, 2005; MAYER *et al.*, 2018) o relevo do substrato marinho é ainda pouco conhecido (Figura 1).

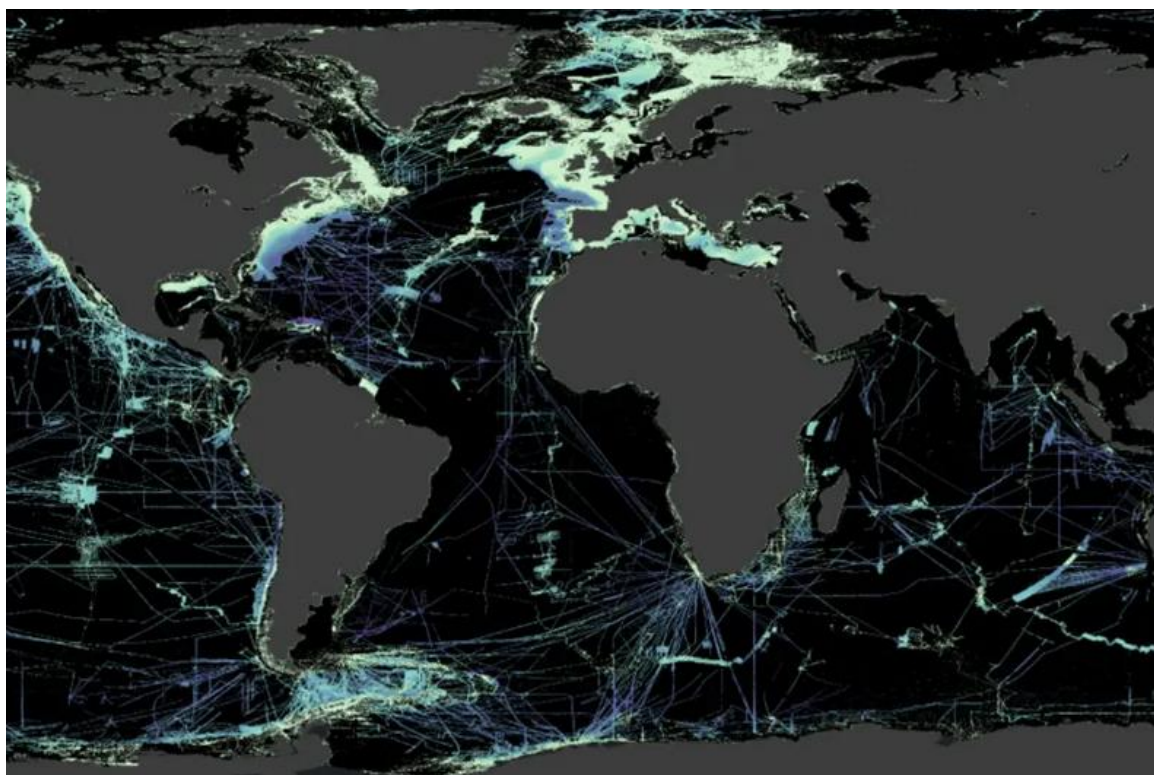


Figura 1: Situação global de mapeamento dos oceanos áreas em verde e roxo indicam os locais já mapeados (NIPPON FOUNDATION-GEBCO SEABED 2030 PROJECT).

Os dados coletados para a elaboração de mapas de geomorfológicos marinhos podem ser usados para uma variedade de aplicações nas áreas de gestão e indústria, incluindo a gestão da pesca e do ambiente espacial marinho, projeto de reservas marinhas, suporte no desenvolvimento de infraestrutura na indústria de óleo e gás, construção de porto e canal de transporte, turismo etc. De modo geral, o mapeamento desses ambientes fornece informações

básicas que são essenciais para que os responsáveis dos setores citados possam tomar decisões em suas áreas (HARRIS e BAKER, 2020).

1.2. Margem e Plataforma continental

De acordo com a UNCLOS (1982) e SOUZA (1999) a margem continental compreende o prolongamento submerso da massa terrestre do Estado costeiro e é constituída pelo leito e subsolo da plataforma continental, pelo talude e pela elevação continental.

Toda a margem continental brasileira é do tipo passiva, encontra-se inserida no oceano Atlântico e apresenta largura bem maior na região Sudeste do que na região Nordeste do país. Esta margem se formou durante o processo de separação dos continentes sul-americano e africano, que teve início com um sistema de falhas transcorrentes do tipo continente-continente (AZEVEDO, 1991; CONDÉ, 2007), sendo subdividida em plataforma continental, talude continental e elevação continental. A plataforma continental que é o foco de estudo deste trabalho, pode ainda ser dividida em plataforma continental interna, plataforma continental média e plataforma continental externa, cada uma delas com suas características biológicas, geomorfológicas e sedimentológicas específicas (BAPTISTA NETO *et al.*, 2004).

De modo geral a plataforma continental é a porção do fundo oceânico que margeia todos os continentes, iniciando da linha de costa até uma profundidade de aproximadamente 200 m. Em quase toda a sua extensão ela se apresenta plana, com uma inclinação suave de aproximadamente 1 metro de declive para cada 1.000 metros de extensão e sua largura varia bastante, desde poucos quilômetros até mais de 400 km.

1.3. Plataforma continental brasileira

Segundo READING (1996), as plataformas continentais ocorrem nas margens dos continentes e ocupam uma área de aproximadamente 7% da superfície do assoalho oceânico e podem chegar até 550 m de profundidade. Localizada em uma margem passiva, a plataforma continental brasileira apresenta largura variável, sendo mais estreita em frente a Salvador, no nordeste do Brasil (8 km) e mais larga na foz do Amazonas (330 km) (VITAL *et al.*, 2005, 2010, 2023).

As principais características desses ambientes são profundidades menores que 200 m, gradiente suave de 1° para cada 1000 m, salinidade marinha normal e uma ampla variedade de

processos físicos, como correntes de marés, ondas, correntes geradas por tempestades e correntes oceânicas (VITAL *et al.*, 2005).

A plataforma continental brasileira é do tipo pericontinental, sendo representada por uma linha de costa, plataforma continental e talude continental (Figura 2).

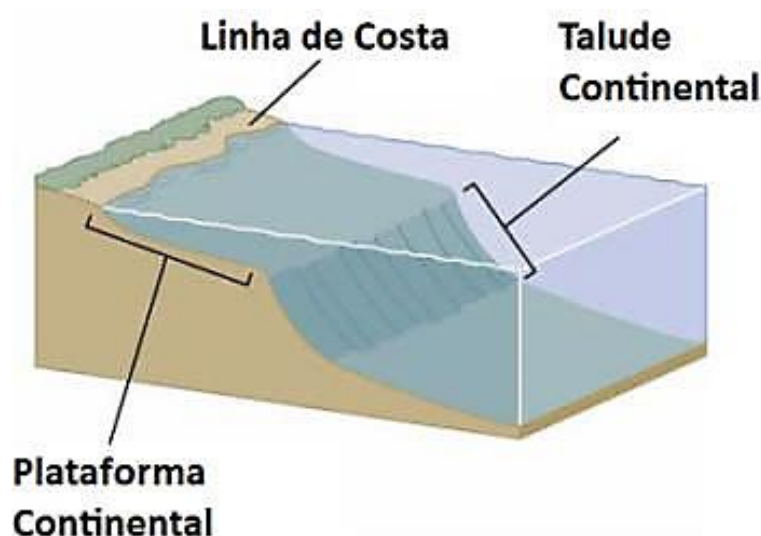


Figura 2: Bloco ilustrando a linha de costa, a plataforma continental e o talude continental (CAMPOS, 2021).

Segundo MACHADO (2015) ao longo de toda a costa brasileira, foram identificados a presença de minerais no leito e subsolo marinho, além da presença de hidrocarbonetos e gás natural, com diferentes graus de viabilidade econômica para exploração.

1.4. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi mapear o substrato marinho da plataforma continental em frente ao delta do rio Parnaíba (NE do Brasil).

E especificamente:

- i) Processar e interpretar dados de batimetria monofeixe;
- ii) Integrar dados batimétricos e sedimentológicos;
- iii) Gerar mapas do substrato marinho.

1.5. Área de estudo

A plataforma estudada localiza-se na margem equatorial brasileira adjacente ao DRP e abrange parte dos estados do Piauí e do Maranhão (Figura 3). Encontra-se em uma zona de

transição entre plataformas estreitas e rasas, típicas da região Nordeste, e plataformas mais largas e profundas, como as da região Norte.

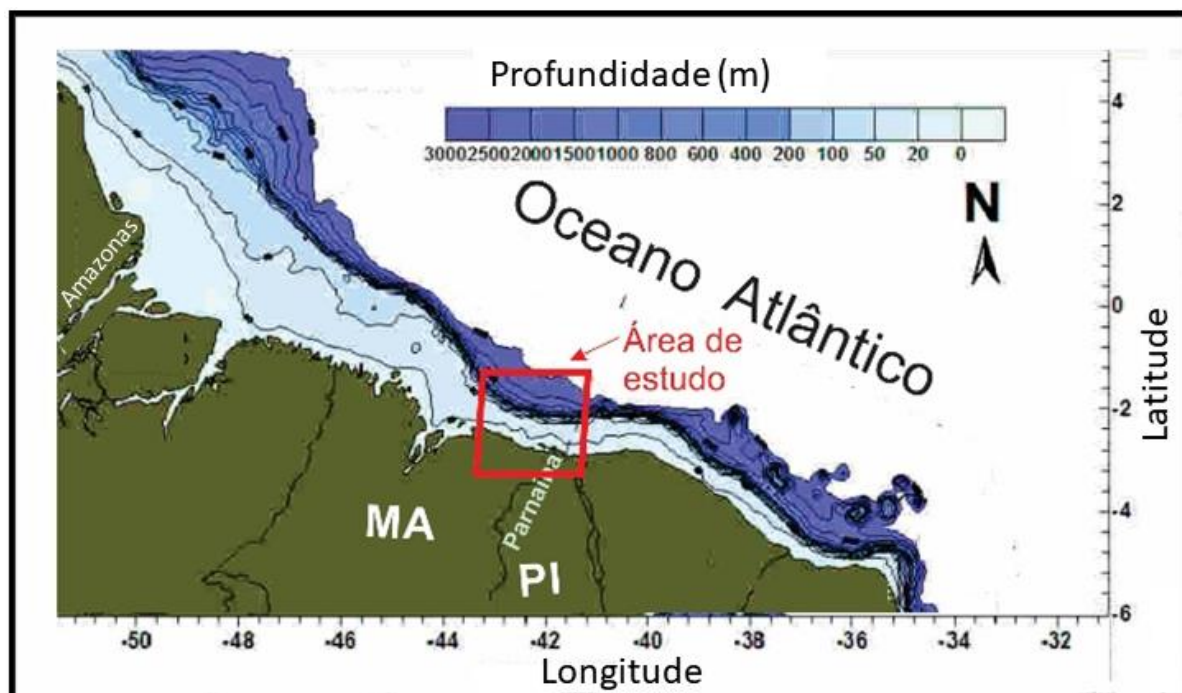


Figura 3: Localização da área de estudo (polígono vermelho). A plataforma continental é representada na cor azul claro (Modificado de VITAL et al., 2010).

O rio Parnaíba é classificado como o maior rio perene da região Nordeste do Brasil, que tem seu curso totalmente inserido na referida região. Divide politicamente os estados do Maranhão e Piauí e apresenta uma extensão de cerca de 1.450 Km, desde suas nascentes principais até a foz, no Oceano Atlântico, onde forma um grande delta em mar aberto (Figura 3).

Na figura 4 é possível observar a área que este trabalho de pesquisa foi desenvolvido, essa área está localizada entre as isóbatas de -10 a -100 metros de profundidade na região em frente ao delta do rio Parnaíba.

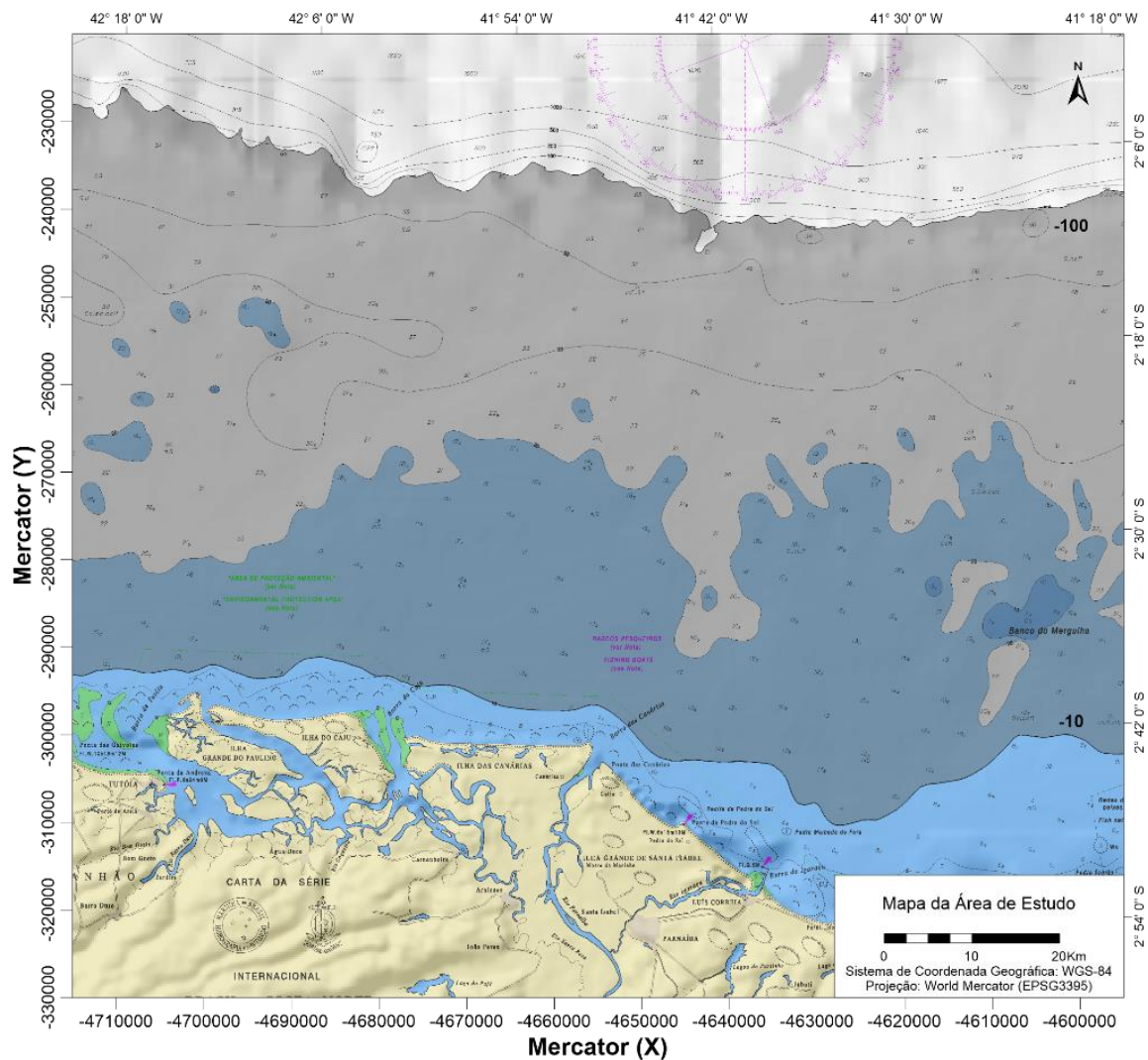


Figura 4: Área de estudos localizada entre as isóbatas de -10 e -100 m de profundidade (Carta 21700, Marinha do Brasil, 2022).



Características da área

De acordo com a combinação desses elementos que influenciam a dinâmica deltaica, pode-se formar deltas dominados por energia de ondas, por marés ou até mesmo, deltas do tipo fluviais. Os deltas dominados por ondas apresentam os sedimentos distribuídos ao longo de toda a linha de costa devido a incidência da energia das ondas, já nos deltas dominados por marés, a desembocadura dos rios é dividida em vários pequenos cursos, onde se instalam regiões de manguezais; O Delta do Rio Parnaíba é classificado como um delta dominado por ondas e influenciado por marés (AQUINO DA SILVA *et al.*, 2015) formado na foz do rio Parnaíba e portanto terá as características de ambos os tipos de deltas.

2.2. Aspectos Meteoceanográficos

De acordo com Andrade JR. *et al.*, (2005) os estados do Piauí e Maranhão estão na zona de transição entre o clima equatorial úmido da Amazônia e o clima semiárido do nordeste brasileiro, sendo classificado como Aw (classificação de Köppen) clima tropical megatérmico e com chuvas de verão (PEEL *et al.*, 2007), apresentando um período de chuvas e um período seco com temperatura média anual de 27,5°C, média de precipitação de 1.223 mm/ano (LINS, 1978; SANTOS FILHO, 2009).

Segundo Bittencourt *et al.*, (1990) e Aquino da Silva *et al.*, (2015) quase todas as ondas da região são provenientes de NE e apresentam entre 0,5 e 1,5 m de altura, alcançando o litoral com ângulos de 15° a 20°.

As marés predominantes na área são classificadas como mesomarés semidiurnas e alcançam amplitude máxima de aproximadamente 6,5 m de acordo com as Tábuas de maré de São Luís e Porto de Tutóia (DHN, 2023).

A combinação das ondas e ventos produz uma corrente litorânea de leste a oeste, característica de toda a costa do NE brasileiro (BITTENCOURT *et al.*, 2005). Ao longo do ano ocorrem ventos alísios de NE no qual suas velocidades médias variam de 2 m/s a 6 m/s (BITTENCOURT *et al.*, 2005).

2.3. Aspectos Geológicos

De acordo com Aquino da Silva (2016), o rio Parnaíba (RP) passa pelas bacias do Parnaíba e de Barreirinhas, que são bacias sedimentares com diferentes mecanismos de formação e idades. Durante maior parte do percurso do RP, ele flui sobre a bacia do Parnaíba e

quase chegando a sua foz, ele alcança a bacia de Barreirinhas. Por este motivo é possível encontrar sedimentos inconsolidados ao longo de toda a margem do rio Parnaíba, tendo influência direta nos sedimentos encontrados ao longo da plataforma continental a sua frente.

A bacia de drenagem do rio Parnaíba ocupa uma área total de 331.441 Km², sendo 249.497 Km² no Piauí, 65.492 Km² no Maranhão, 13.690 Km² no Ceará e 2.762 Km² de área em litígio entre Piauí e Ceará (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006).

A Região do rio Parnaíba encontra-se fixada em duas grandes unidades estruturais: o escudo cristalino (15% da área) e a Bacia sedimentar do Parnaíba (85% da área). Caracteriza-se, principalmente, por sedimentos de cobertura Cenozóico (areias e argilas), Rochas Sedimentares do Mesozóico e Paleozóico (arenitos e argilitos) e Rochas Pré-Cambrianas (gnaises, granitos e migmatitos).

Geocronologicamente a bacia do Parnaíba é dividida em três Supersequências da era Paleozoica. A mais antiga corresponde a supersequência Siluriana e é composta litoestratigraficamente pelo grupo Serra Grande, acima dela está a supersequência Devoniana que corresponde ao Grupo Canindé, acima do grupo Canindé encontra-se o grupo Balsas que corresponde a supersequência Carbonífero-Triássico, acima do grupo Balsas tem-se o grupo Mearim e acima desses grupos está a supersequência Cretáceo (CAROZZI *et al.*, 1975; GÓES *et al.*, 1990; VAZ *et al.*, 2007).

A bacia de Barreirinhas tem aproximadamente 40.000 km², se desenvolveu sobre a bacia do Parnaíba e ocupa a porção costeira da plataforma continental do estado do Maranhão (Figura 6).

É separada da Bacia do Parnaíba pelos arcos tectônicos de Ferrer-Rosário-Bacaba e o arco Urbano Santos (Figura 6). Estes arcos interferiram fortemente na evolução das bacias da margem continental e possibilitaram a erosão do pacote sedimentar superior da Bacia do Parnaíba (CPRM, 2000).

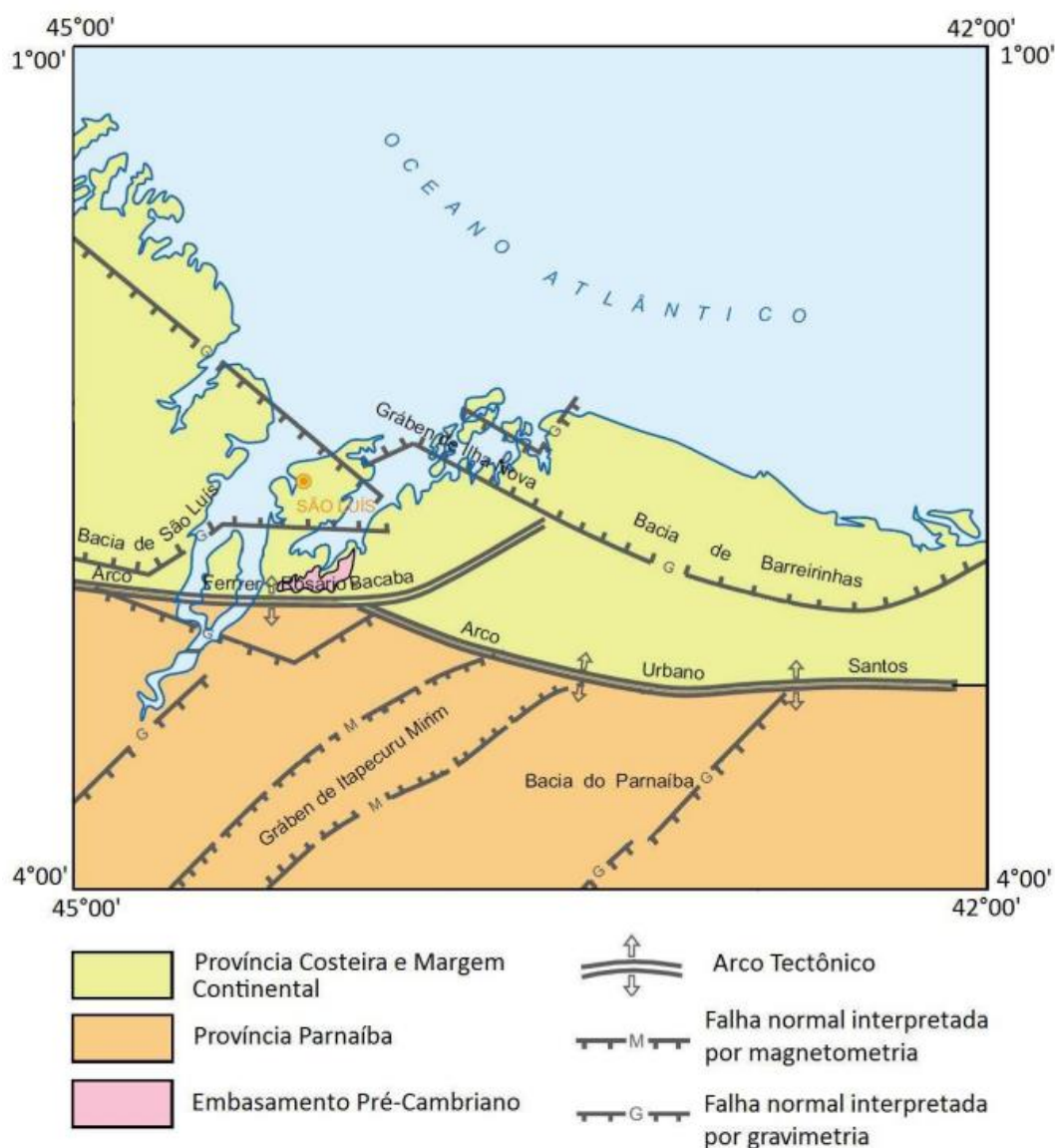
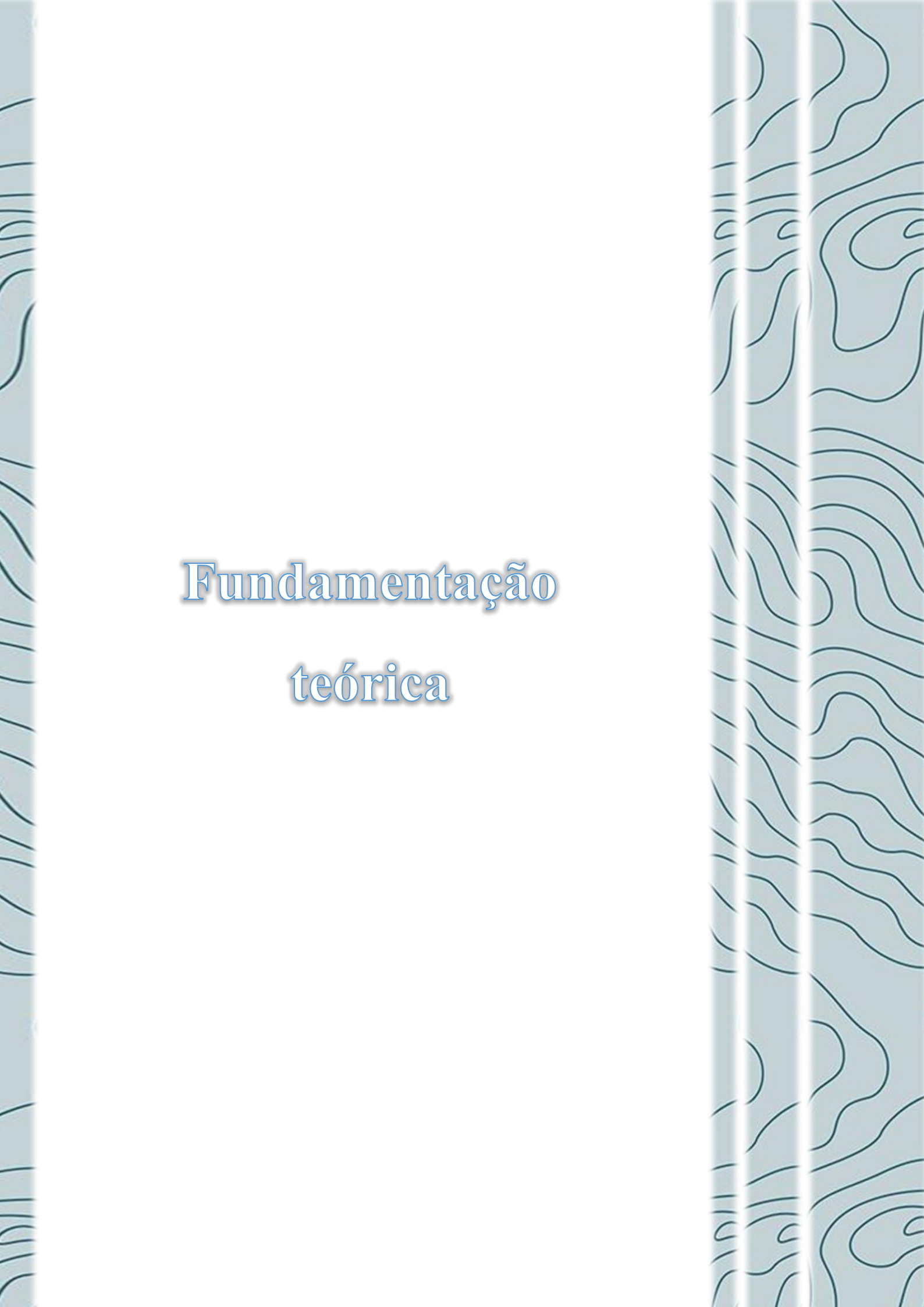


Figura 6: Arcabouço estrutural da bacia do Barreirinhas e da bacia do Parnaíba (Modificado por ALMEIDA, 2000).

Seu embasamento é composto pela coluna estratigráfica da bacia do Parnaíba e seu preenchimento é composto por duas sequências estratigráficas, a de rifte de idade Albiano, que é formada pelo grupo Canárias e a de margem passiva, formada pelos grupos Cajú, Humberto de Campos, formação Pirabas e formação Barreiras (FEIJÓ, 1994).

Trabalhos como os de FIGUEIREDO *et al.*, (1982), REGALI *et al.*, (1985), ZANOTTO e SZATMARI (1987), FEIJÓ (1994), TRODSORF *et al.*, (2007) e VAZ *et al.*, (2007), detalham cada um dos grupos que compõem a carta estratigráfica da bacia de Barreirinhas.



Fundamentação teórica

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Batimetria monofeixe

A batimetria é considerada um método geofísico indireto utilizada para medição da profundidade de uma determinada área marítima, seja ela fluvial, lacustre, de canais naturais ou artificiais e do leito oceânico. Para a realização de tal medição são utilizados ecobatímetros que operam emitindo pulsos acústicos através de uma fonte, esses sinais acústicos viajam através da coluna d'água até o leito marinho e através do tempo de emissão e recepção desse sinal nos sensores do ecobatímetro é medido a profundidade do local (BAPTISTA NETO *et al.*, 2004). Para determinar a profundidade, os valores medidos são substituídos na seguinte equação (eq.1):

$$P = \frac{V_{H_2O} \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

Onde:

P é a profundidade medida;

V_{H_2O} é a velocidade do som na água (~1500 m/s);

Δt é o tempo medido entre a emissão e a recepção do sinal no ecobatímetro.

Na batimetria monofeixe (Figura 7) a superfície marinha a ser mapeada deve ser realizada em malhas de linhas equidistantes, funcionando como orientação para a realização do levantamento. Essas linhas, chamadas de linhas regulares de sondagem, a depender do objetivo do mapeamento podem ser paralelas, circulares, radiais ou em ziguezague.

Os transdutores do ecobatímetros ficam fixados no casco da embarcação e emitem um único feixe com abertura de aproximadamente 4°. De acordo com o equipamento utilizado e com a profundidade a ser medida, as frequências emitidas variam de aproximadamente 210 kHz para a plataforma continental, podendo chegar a uma profundidade de até 130 m, a 18 kHz podendo atingir profundidades de 5.000 metros (GARCIA, 2021).

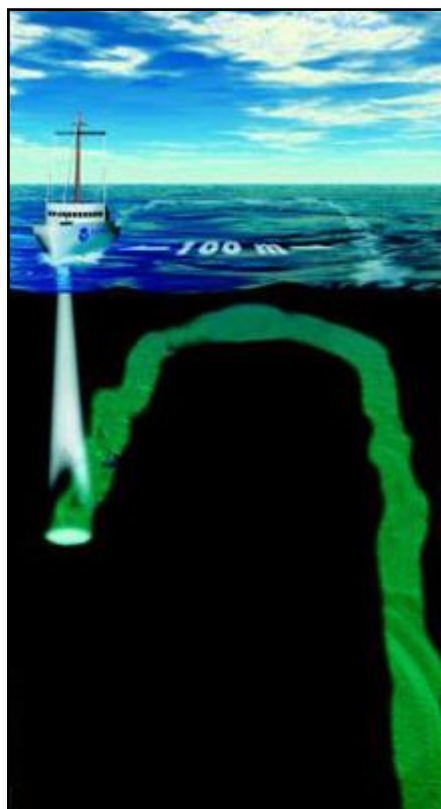


Figura 7: Esquema de levantamento batimétrico monofeixe (NOAA, 2007).

3.2. Interpolação dos dados

A *Krigagem* é uma técnica de gridagem geoestatística para dados aleatórios, linhas de dados não paralelos ou linhas de dados ortogonais (GEOSOFT, 2022). O método da krigagem (Figura 8) calcula um variograma dos dados mostrando a correlação entre eles como uma função da distância (LANDIM, 2000; CHIAO *et al.*, 2014). Quanto maior for a distância entre os pontos dos dados, maior será a variação entre eles. De acordo com o variograma, pode-se selecionar o modelo que melhor define a variância dos dados. O processo de krigagem exige uma grande capacidade de processamento e a depender do tamanho do conjunto de dados utilizados, isto pode se tornar um fator limitante na escolha deste método.

A mínima curvatura é um método de gridagem que encaixa a superfície mais suave possível aos dados pontuais e os interpola através do encaixe de uma superfície de mínima curvatura aos dados brutos pontuais XYZ (YANG *et al.*, 2004; CHIAO *et al.*, 2014). Esse método é ideal para quando os dados são esparsamente amostrados e uma variação relativamente suave entre os dados pontuais é esperada, ou ainda incluir linhas de controle. O tempo de processamento é menor que o utilizado pelo método da krigagem, porém este método

de interpolação tende a gerar artefatos não reais ao dado, o que pode ser prejudicial na hora da interpretação.



Figura 8: Representação dos dados aleatórios, linhas de dados não paralelas e linhas de dados ortogonais (Modificado de Geosoft, 2022).

3.3. Modelo Digital de Elevação (MDE)

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o MDE representa as altitudes da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela, como por exemplo as dunas e a cobertura vegetal de um determinado local. As diferentes altitudes da superfície topográfica podem ser identificadas através da construção de mapas de MDE, como os apresentados nas figuras 14, 15 e 16.

O mapa de declividade (*slope*) representa a taxa de alteração da elevação de cada célula do modelo de elevação digital (ESRI, 2022), ele é o gradiente em direção à declividade máxima do assoalho oceânico (CORRÊA, 2022); em outras palavras a declividade de uma superfície é o ângulo que esta superfície faz com um plano horizontal (Figura 9).

É expresso em graus, é compreendido como um atributo de terreno fundamental à análise do fundo marinho, já que a declividade do terreno exerce influência sobre as características físicas dos materiais (CORRÊA, 2022) e sobre as correntes, influenciando a taxa de erosão em determinada área e possibilitando adequações distintas a distribuição da fauna. Um declive de valor muito elevado, representando uma brusca ruptura no padrão local pode materializar uma descontinuidade, como uma falha. (SILVA FILHO, 2004).

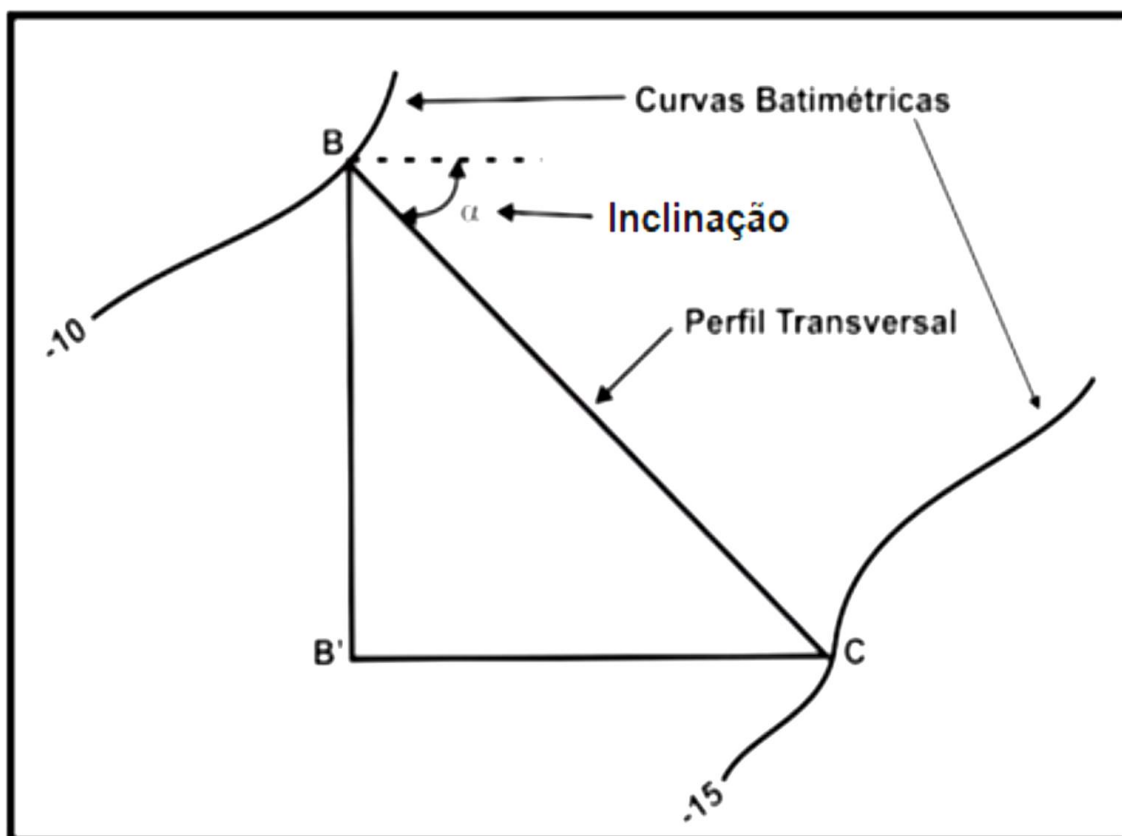


Figura 9: Esquema representativo da declividade de uma região (Modificado de Corrêa 1990 por Corrêa, 2022).

A declividade é obtida através da divisão da equidistância entre duas curvas batimétricas ou topográficas consecutivas e o valor medido entre dois pontos de intersecção sucessivos através da equação abaixo (eq.2).

$$\alpha = \arctg \frac{BB'}{B'C} \quad (2)$$

De acordo com Corrêa (2022), para a obtenção do valor de declividade é necessário traçar perfis transversais que deverão sobrepor o mais perpendicularmente possível as curvas de nível ou as curvas batimétricas (Figura 10).

O mapa de direção da declividade (aspecto) identifica a direção da bússola que segue a declividade para cada localização, ou seja, ele mede a direção de declividade da subsuperfície (ESRI, 2022) e ajuda a identificar pequenas variações na morfologia que passariam despercebidas em outros modelos.

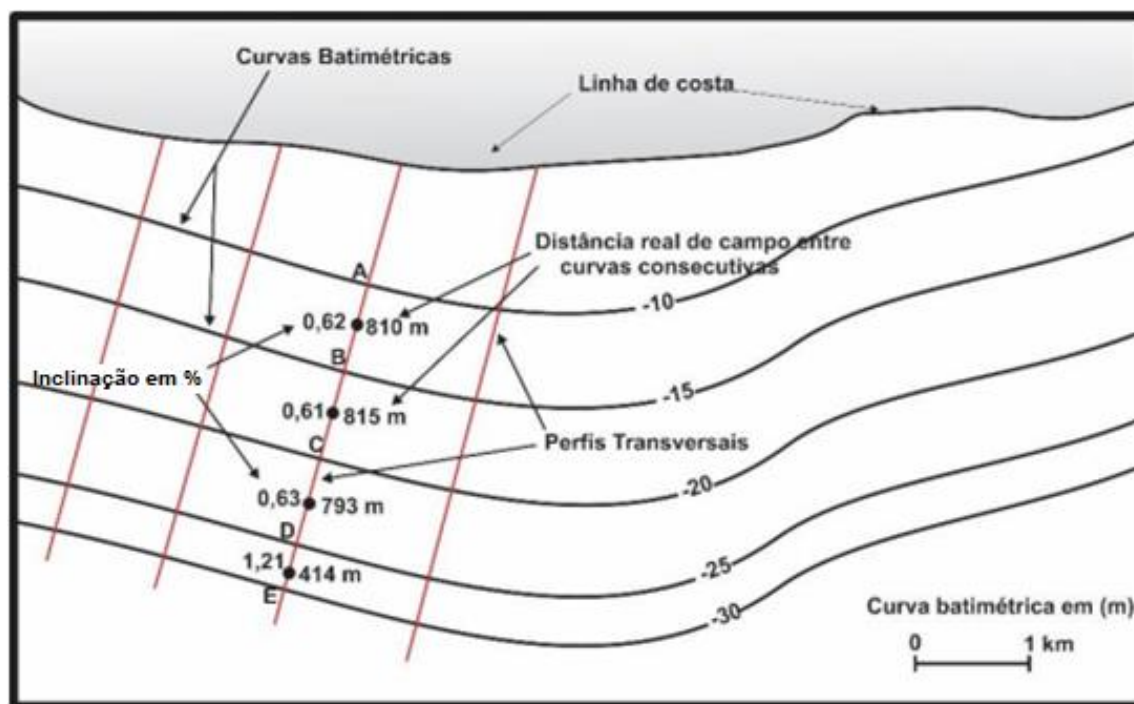
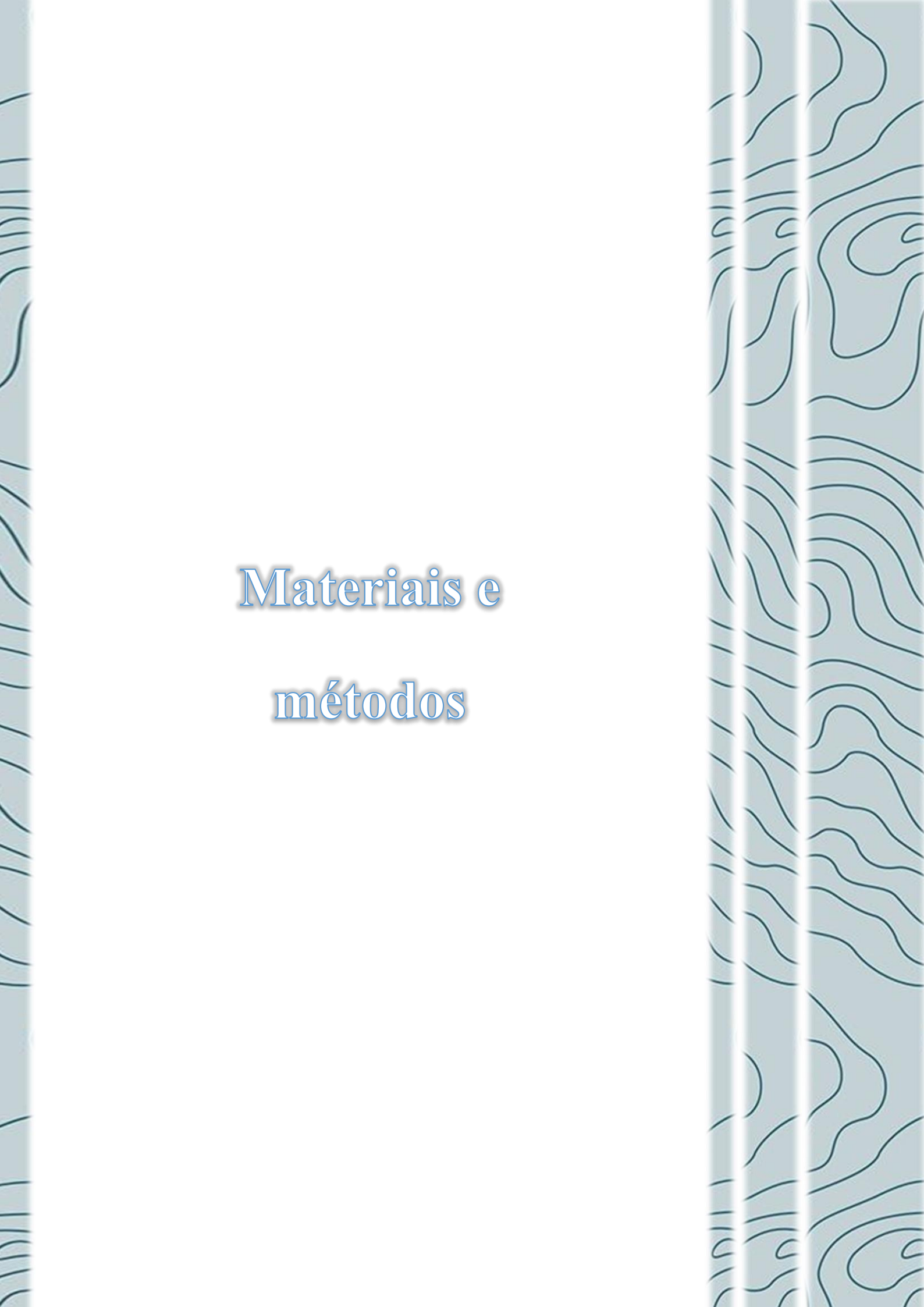


Figura 10: Representação de linhas perpendiculares as curvas de níveis (Modificado de Corrêa 1990 por Corrêa, 2022).



Materiais e métodos

4. MATERIAIS E METODOS

4.1. Dados batimétricos

O banco de dados utilizado neste trabalho é composto de dados hidroacústicos, mais especificamente dados batimétricos do tipo monofeixe, fornecidos pelo BNDO no formato ASCII, e foram coletados pelo centro de hidrografia da Marinha (CHM) na fase I do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC) e digitalizados pelo Laboratório de Topografia e Geodesia (LTG) presente na Universidade de São Paulo (USP).

Os dados utilizados neste trabalho compreendem as folhas de bordo números Fb500-001_75 (contendo 9.425 pontos), Fb500-001_76 (contendo 8.819 pontos) e Fb600-001_74 (contendo 6.873 pontos) do relatório gerado pelo LTG, no total foram 25.117 pontos digitalizados. A digitalização da posição de cada um dos pontos foi realizada pelo LTG e respeitou as normas para lançamento da profundidade estabelecida pela Marinha do Brasil (Figura 11).

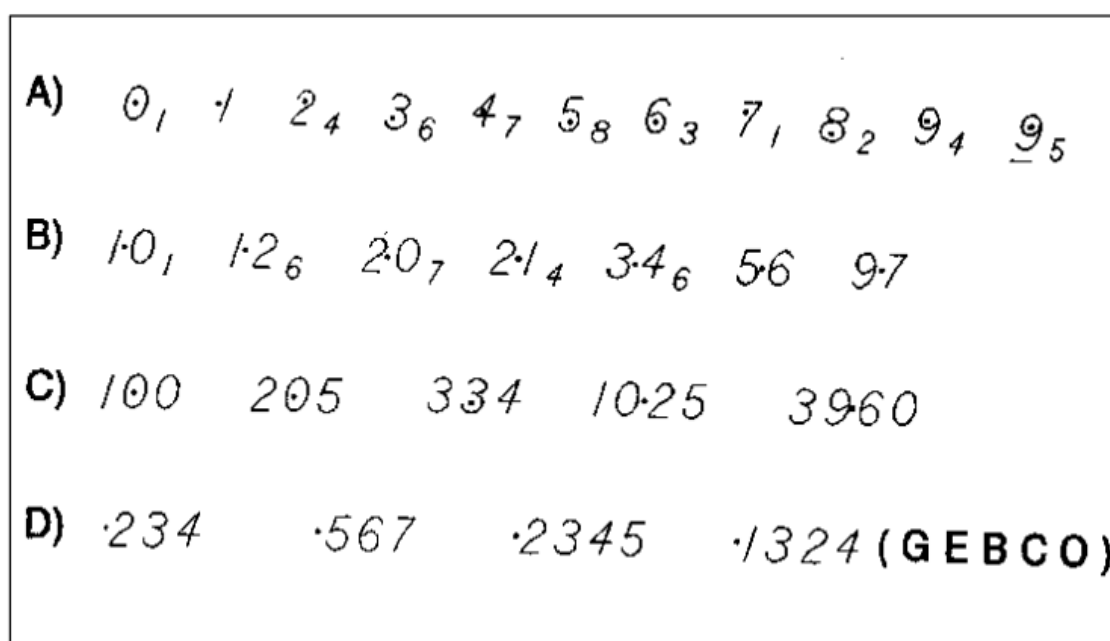


Figura 11: Norma para lançamento das profundidades (Centro de Hidrografia da Marinha).

Os pontos de sondagem utilizados neste trabalho (Figura 12) foram adquiridos com distância lateral variando de 0.8 a 1 km, entre uma linha e outra a distância varia de 1.5 a 1.8 km, porém uma parte dos pontos não segue estes valores podendo variar para mais ou para menos, por este motivo foi escolhido realizar a interpolação dos dados utilizando o método da krigagem.

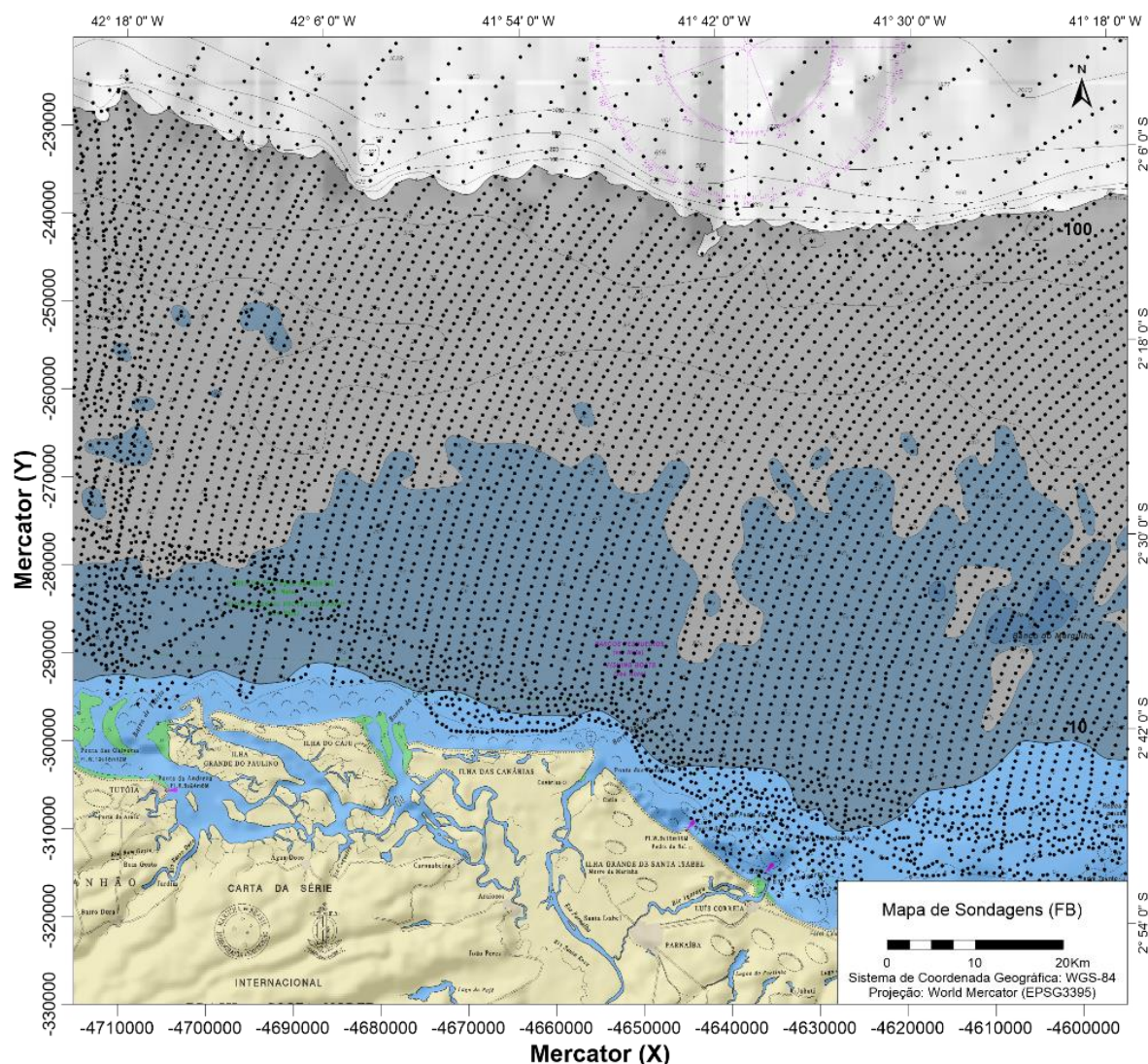


Figura 12: Pontos de sondagem da área de estudo (Modificado da Carta náutica 21700, Marinha do Brasil).

Os dados foram digitalizados na escala de 1:150 000, para o qual foi adotado a projeção de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), onde os valores obtidos neste sistema são medidas de distâncias, o que o torna muito mais simples e permite identificar qualquer ponto da superfície com precisão de 1 metro. Nesse sistema o eixo y está associado ao eixo N e o eixo x está associado ao eixo E, dessa forma as coordenadas do eixo N aumentam de baixo para cima e as do eixo E aumentam da esquerda para a direita (MACHADO Jr. *et al.*, 2004).

Para este trabalho o mapa de batimetria foi produzido utilizando dois interpoladores, o de Krigagem (ARAÚJO, 2011; OLIVEIRA, 2009; SILVA FILHO, 2007; RESCK *et al.*, 2007; LIMA, 2006) e o de mínima curvatura. A partir do mapa de batimetria derivou-se os demais mapas: o de declividade e o de direção de declividade, ambos produzidos no *software* Surfer 13 (Figura 13).

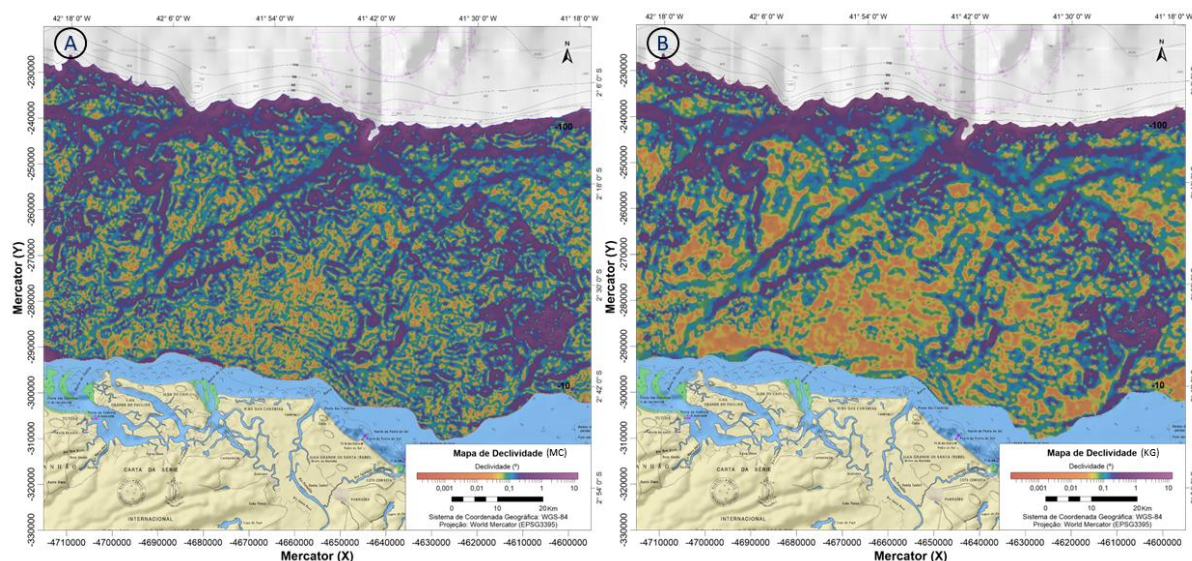


Figura 13: Interpoladores utilizados: A) Aplicação do método da mínima curvatura; B) Aplicação do método da krigagem (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).

Os resultados apresentados em cada mapa são dependentes da escala utilizada para sua geração; a escala escolhida irá identificar diferentes características geomorfológicas na área, que podem vir a variar de finas a amplas. Para se obter as melhores classificações de zonas e estruturas, foram geradas grades de diferentes escalas para o local de estudos, tendo sido utilizados os fatores de escala de 50, 100 e 1000.

A classificação da geomorfologia foi baseada na análise conjunta entre os mapas gerados de batimetria, de declividade e de direção da declividade (*aspecto*). Para a classificação geomorfológica do fundo marinho, o mapa de declividade foi utilizado para distinguir os limites entre planícies (até 1 grau de declividade), elevações e declives suaves (de 1 a 5 graus de declividade) e elevações e declives íngremes (maiores que 5 graus de declividade). O mapa de direção de declividade (*aspecto*) foi utilizado para determinar a orientação de declividade das feições.

4.2. Dados sedimentológicos

Além dos mapas de batimetria, declividade e direção de declividade, também foi construído um mapa de amostras de sedimentos superficiais, para auxiliar na compreensão geomorfológica do local.

A coleta das amostras sedimentológicas foi realizada pelo centro de hidrografia da Marinha do Brasil (CHM) e qualquer pesquisador que trabalhe em uma determinada área, pode solicitar através de um e-mail para o banco nacional de dados oceanográficos (BNDO) as

amostras do seu local de estudo. Desta forma, foram repassados um total de 20 pontos de amostragem (Tabela 1) para a área da plataforma continental em frente ao delta do rio Parnaíba.

Tabela 1: Sedimentos do fundo marinho

Composição do fundo			
LAT	LONG	Sedimentos	Quantidade de amostra
-23400	-414200	Cascalho com biodetritos	1
-23300	-455100	Areia grossa com cascalho - com biodetritos	1
-23818	-414818	Areia grossa	1
-24000	-414200	Areia grossa com cascalho - com algas biodetrítica e quartzosa	1
-24521	-414121	Areia grossa - com conchas	1
-23300	-422300	Areia média	5
-24624	-414018		
-23452	-414319		
-23706	-415748		
-23742	-415748		
-24030	-414224	Areia média - com conchas	1
-23400	-424000	Areia média – quartzosa	1
-23348	-422712	Areia fina	4
-24024	-414631		
-23957	-414433		
-23324	-420518		
-23704	-421215	Areia fina – biodentrítica	1
-24000	-420200	Areia fina com lama (silte) quartzosa	2
-23900	-422000		
-23312	-415942	Areia fina – terrígena	1



Resultados e discussões

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para a plataforma continental brasileira adjacente ao delta do rio Parnaíba, com base na análise dos MDE e dos dez perfis batimétricos ao longo da área de trabalho, seguido das discussões, associando sempre que possível a literatura existente.

5.1. Resultados

5.1.1. Mapas da plataforma continental adjacente ao Delta do Parnaíba

O método de interpolação escolhido para confecção dos mapas foi o método da krigagem, ao invés do método de mínima curvatura. Ambos os métodos apresentaram mapas similares em feições, porém o método da mínima curvatura como já se era esperado, criou artefatos inexistentes ao dado e o deixou bastante ruidoso, ao contrário do método da krigagem que não apresentou tantos ruídos e se mostrou mais parecido com o que se era esperado para a área.

O mapa batimétrico apresentado na figura 14, mostra feições com profundidades que variam de -10 a -100 metros em direção a quebra da plataforma. Utilizando-se dos mapas de batimetria (Figura 14), declividade (Figura 15) e de direção da declividade (Figura 16) foi possível observar a grande heterogeneidade que compõe a região. A declividade média medida foi de $0,06^\circ$ ou 1:1000 e a direção da declividade aponta em direção a quebra da plataforma. Feições de destaque são ressaltadas nas figuras por letras (a, b, c, d).

Foi possível observar entre as isóbatas de -10 m e -19 m de profundidade a presença de alguns lineamentos com direção SE – NO (b), que foram mais bem evidenciados no mapa de direção da declividade (Figura 16), além da presença de pequenas manchas de relevos positivos (c) e uma área com a presença de relevo negativo. A partir da isóbata de -20 m até a isóbata de -29 m foi identificada uma grande área de relevo negativo (d), além de manchas que representam relevo positivo (a) na região. Após a isóbata de -30 m observa-se a profundidade decaindo até a quebra da plataforma.

No mapa de direção de declividade (Figura 16) o lineamento SE – NO encontra-se bem demarcado (b); além desse lineamento, também foi possível observar a presença de outros lineamentos na mesma direção. Entretanto, estes não aparecem nos mapas de batimetria e

declividade da superfície. Lineamentos com direção preferencial de SO – NE também foram identificados.

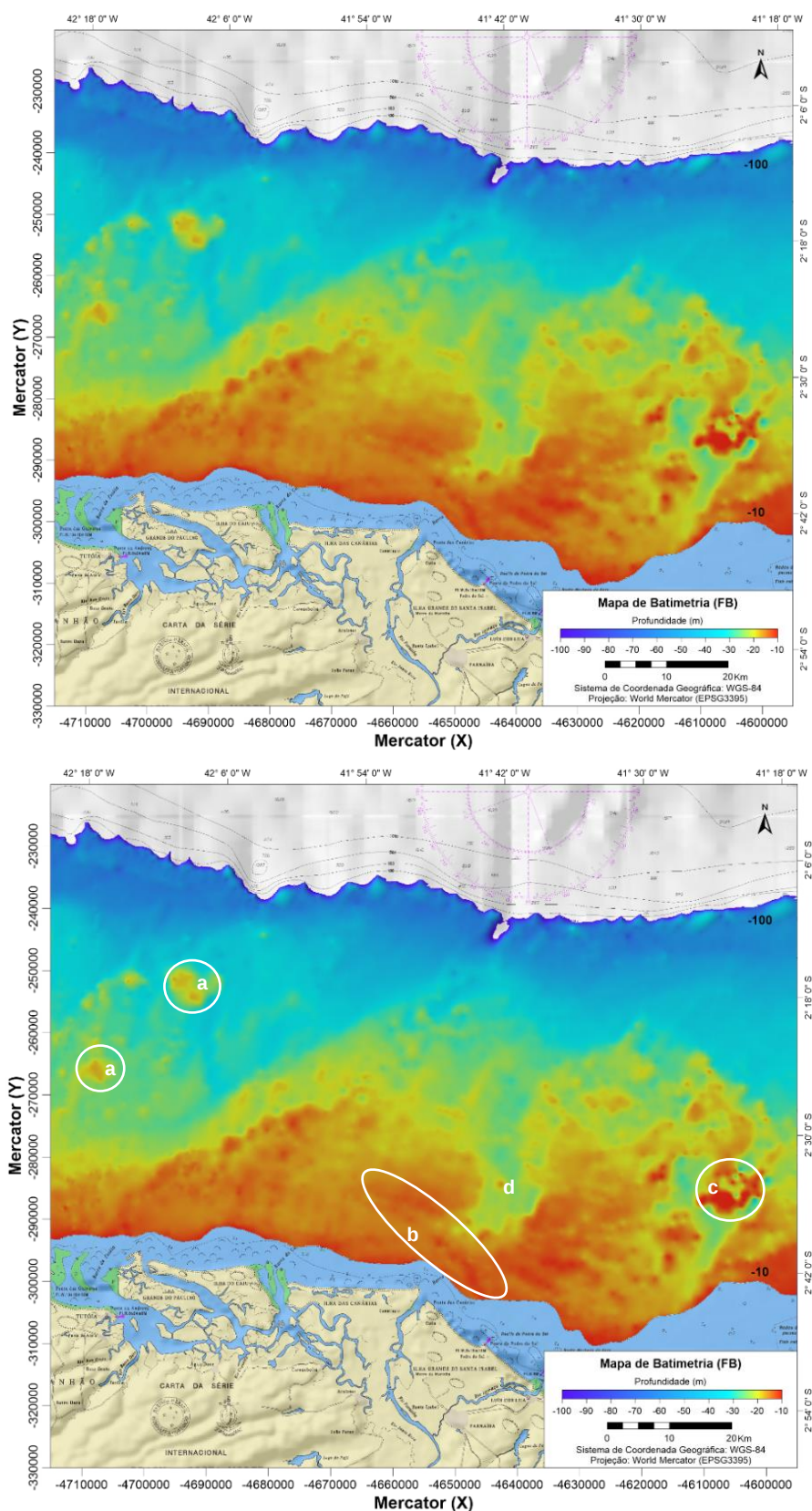


Figura 14: Mapa de batimetria (KG) indicando a presença de altos relevos (a,b,c) e baixos relevos (d) (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).

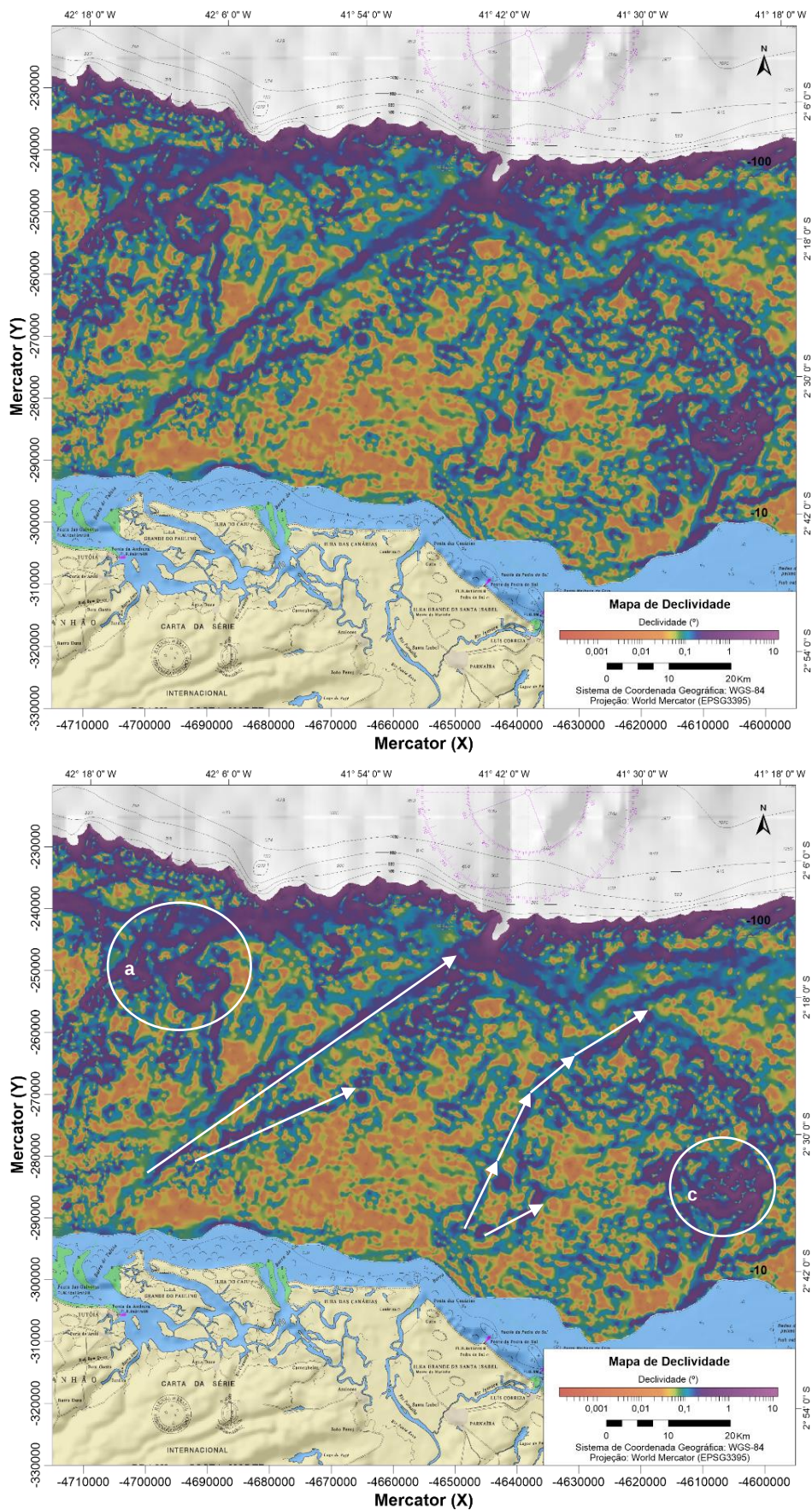


Figura 15: Mapa de declividade da superfície (slope, KG) indicando a presença de feições com alto declive (a,c) e setas indicando a presença de regiões com lineamento SO-NE (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).

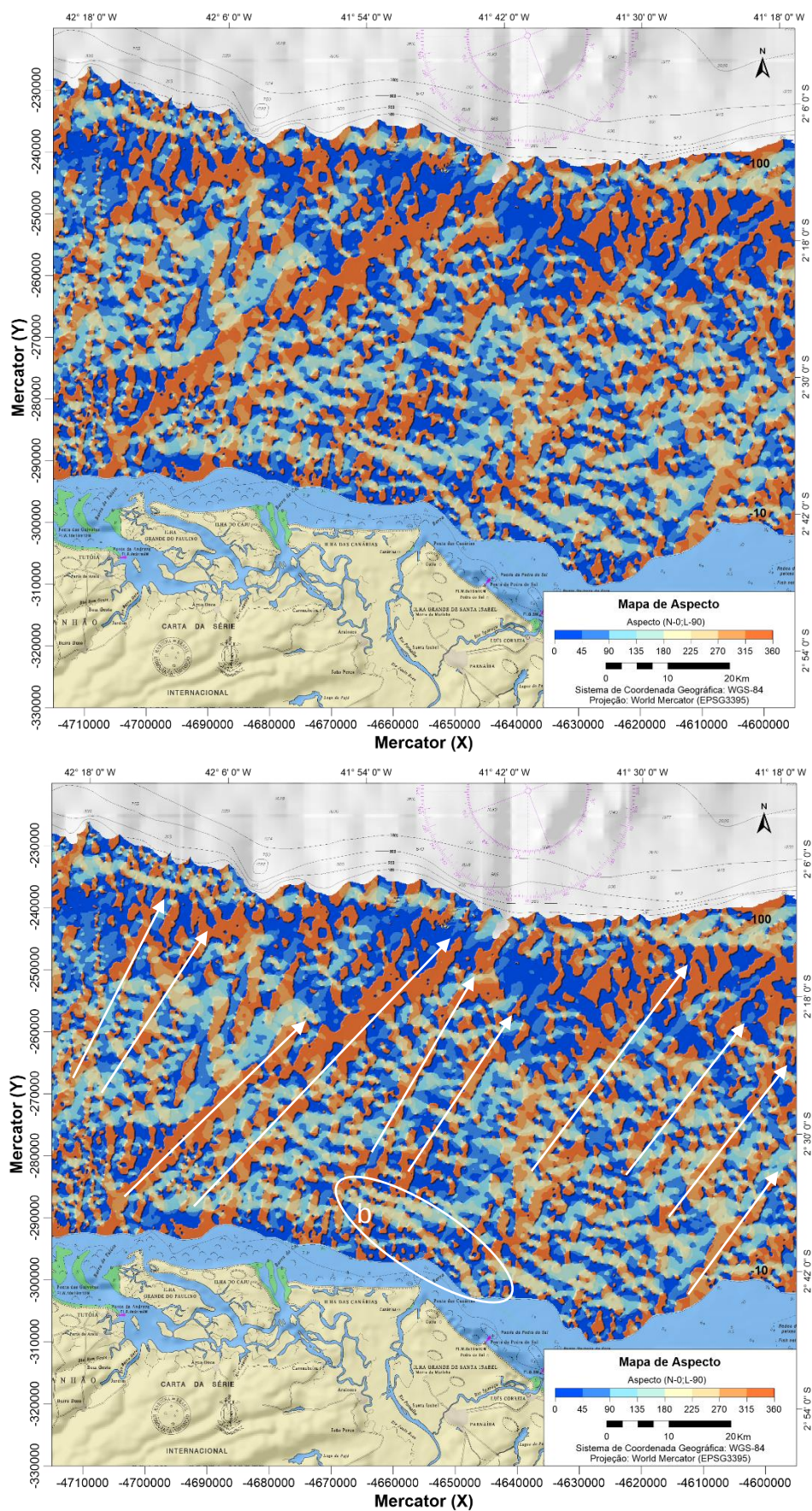


Figura 16: Mapa de direção da declividade (KG) com setas indicando a direção preferencial do declive dos lineamentos (SO-NE) (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).

5.1.2. Sedimentologia

O mapa da figura 17 mostra que das vinte amostras disponíveis para o estudo, catorze delas estão localizadas até a isóbata de -19 m, duas entre as isóbatas de -20 a -29 m e quatro fora da área de pesquisa. Nenhuma das coletas foi realizada após a isóbata de -30 m. As amostras concentram-se na região leste e sul entre as isóbatas de -10 a -19 m. A análise sedimentológica mostrou a predominância da granulometria areia, variando de fina a grossa, podendo ter a presença de cascalho. A composição pode ser quartzosa ou biodetrítica; estes últimos em geral nas frações mais grossas.

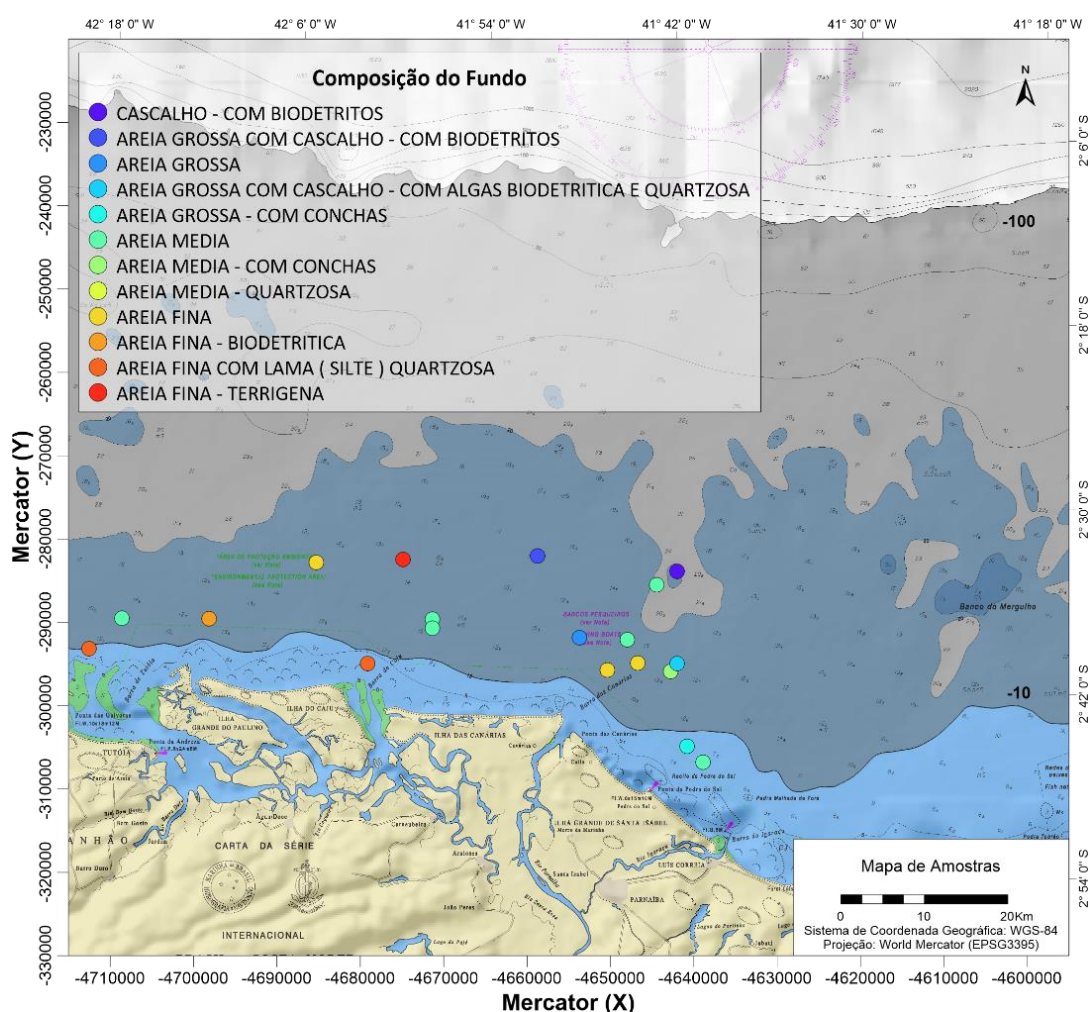


Figura 17: Mapa de distribuição das amostras e suas granulometrias (Modificado da carta náutica 21700 da Marinha do Brasil).

O mapa representado na figura 18, mostra o mapa de amostras (figura 17) e o mapa batimétrico (figura 14) sobrepostos, desta forma foi possível observar que os lineamentos SE – NO (b) vistos na figura 14 encontram-se em região com presença de areia de granulometria fina a média, de composição biodetrítica, com conchas e quartzosa. Na parte mais a oeste a

composição é de areia fina com lama, areia biodetrítica e areia terrígena. Já na parte do vale (d) foi identificada a presença de cascalhos com biodetritos e areia média com conchas.

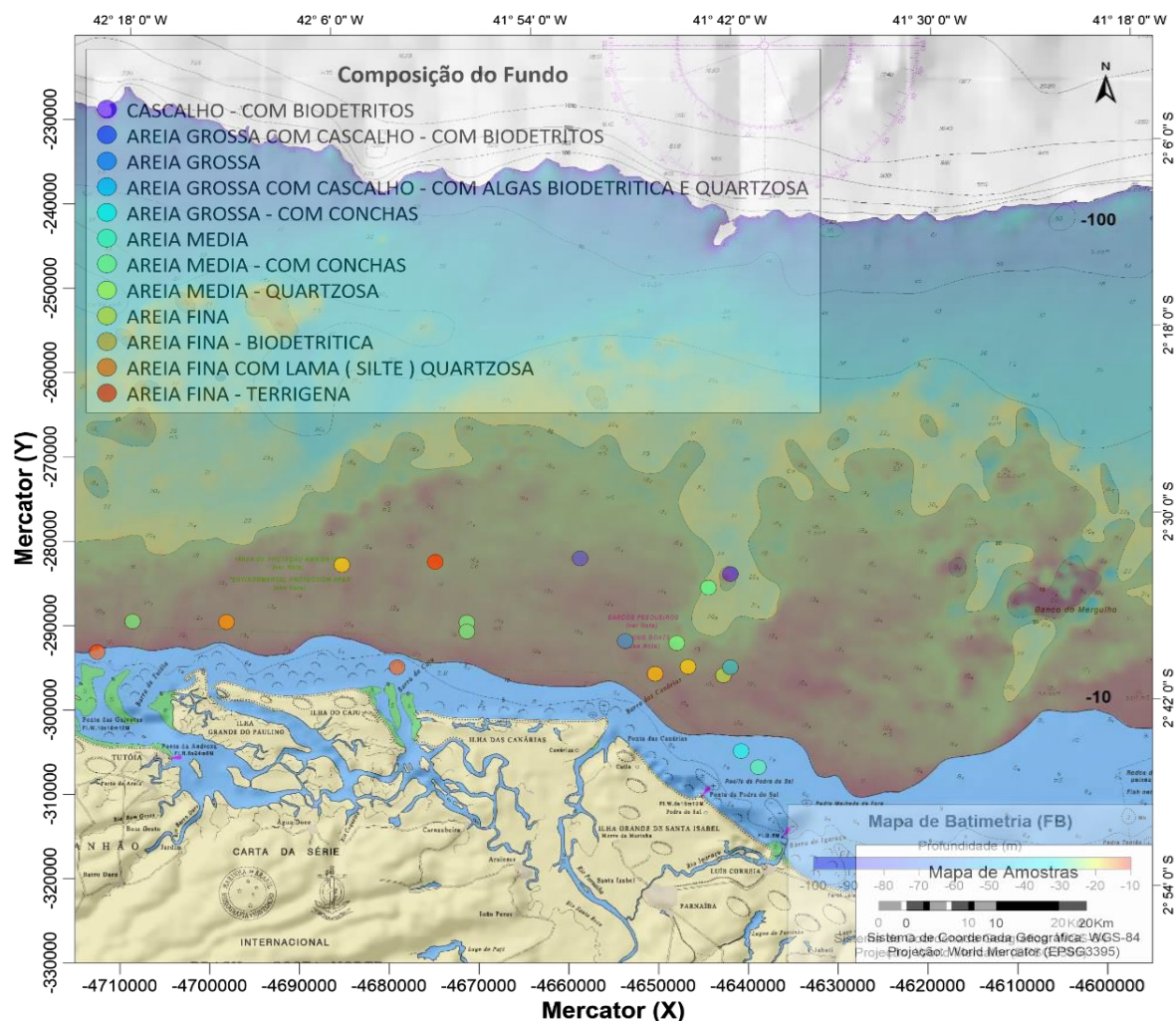


Figura 18: Mapa de amostras sobreposto ao mapa batimétrico (Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil).

5.1.3. Perfis batimétricos

A plataforma continental foi subdividida em três partes: plataforma interna, plataforma média e plataforma externa. Essa subdivisão levou em consideração as informações obtidas nos mapas das figuras 14, 15 e 16 sobre as feições referentes aos altos e baixos relevos e a profundidade com que estas feições aparecem.

Para melhor compreensão e interpretação dessas feições, além da subdivisão realizada na plataforma continental, foram traçados dez perfis batimétricos (Figura 19).

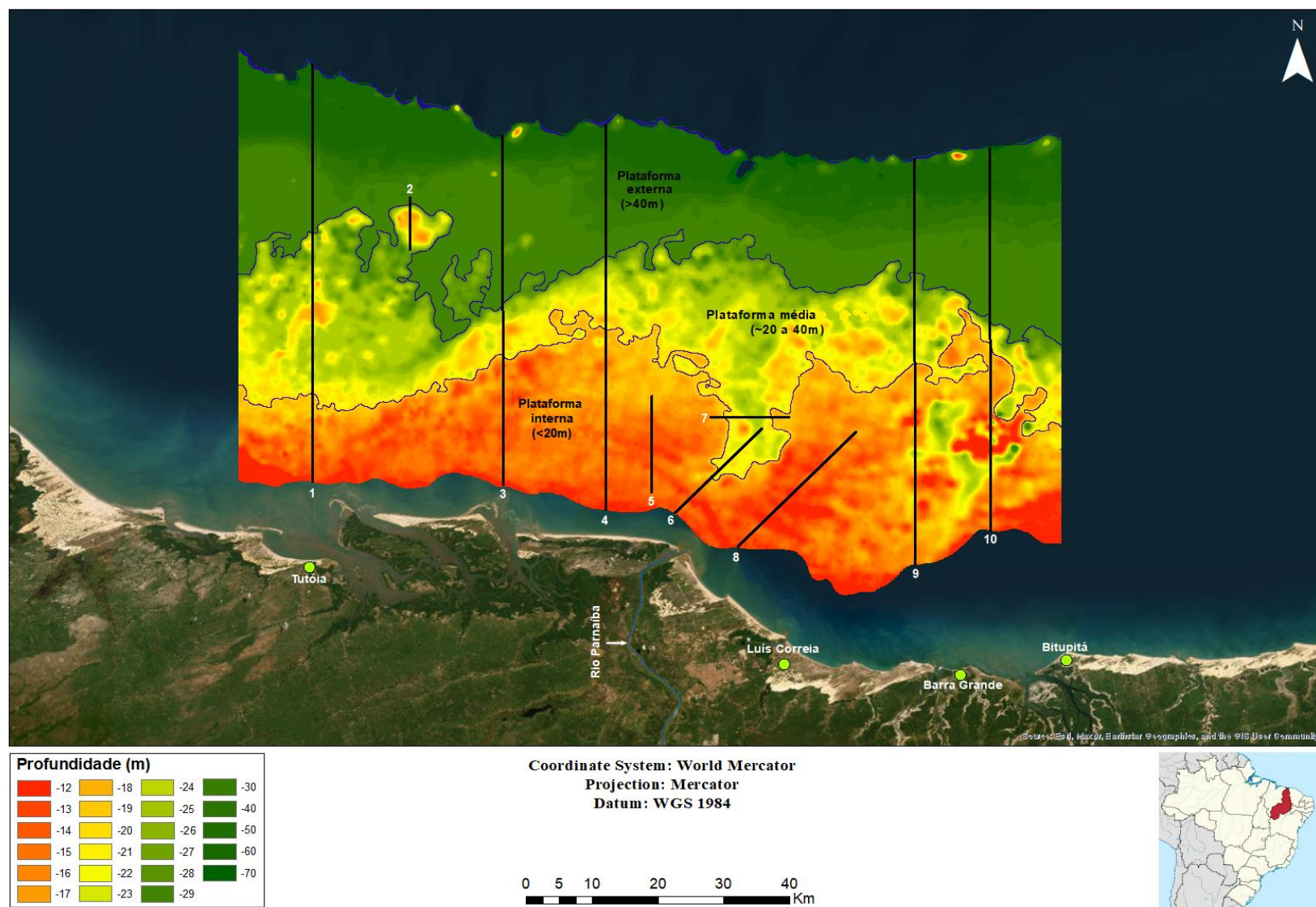


Figura 19: Mapa de perfis batimétricos (1 a 10)

No perfil 1 (Figura 20) foi possível observar a divisão da plataforma continental em interna, média e externa, com extensão de aproximadamente 14 km, 25 km e 26 km respectivamente. A plataforma interna apresenta uma planície, seguida de um declive suave na zona de transição da plataforma interna para a plataforma média. Na plataforma média foi possível observar uma planície seguida de alternâncias de alto relevo e baixo relevo com cerca de 5 m de comprimento e 8 m de altura, seguidos novamente por uma planície, após a planície ocorre um declive íngreme que marca a passagem da plataforma média para a externa. A plataforma externa foi marcada pela presença de um declive íngreme e um alto relevo próximo a quebra da plataforma.

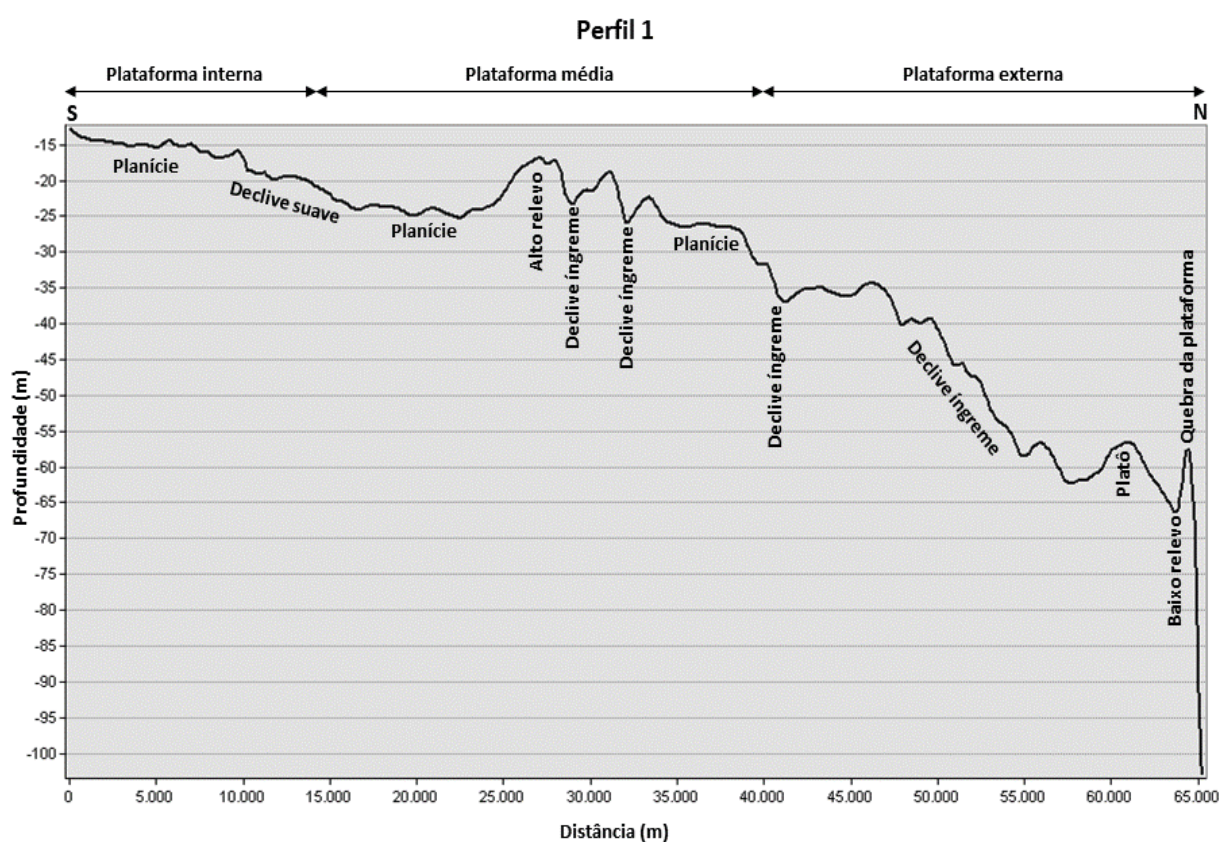


Figura 20: Perfil batimétrico 1 um indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.

O perfil 2 (Figura 21) encontra-se inserido na plataforma média com aproximadamente 9 km de extensão, marcado por uma elevação, com altura de 13 m e extensão de 8 km de comprimento.

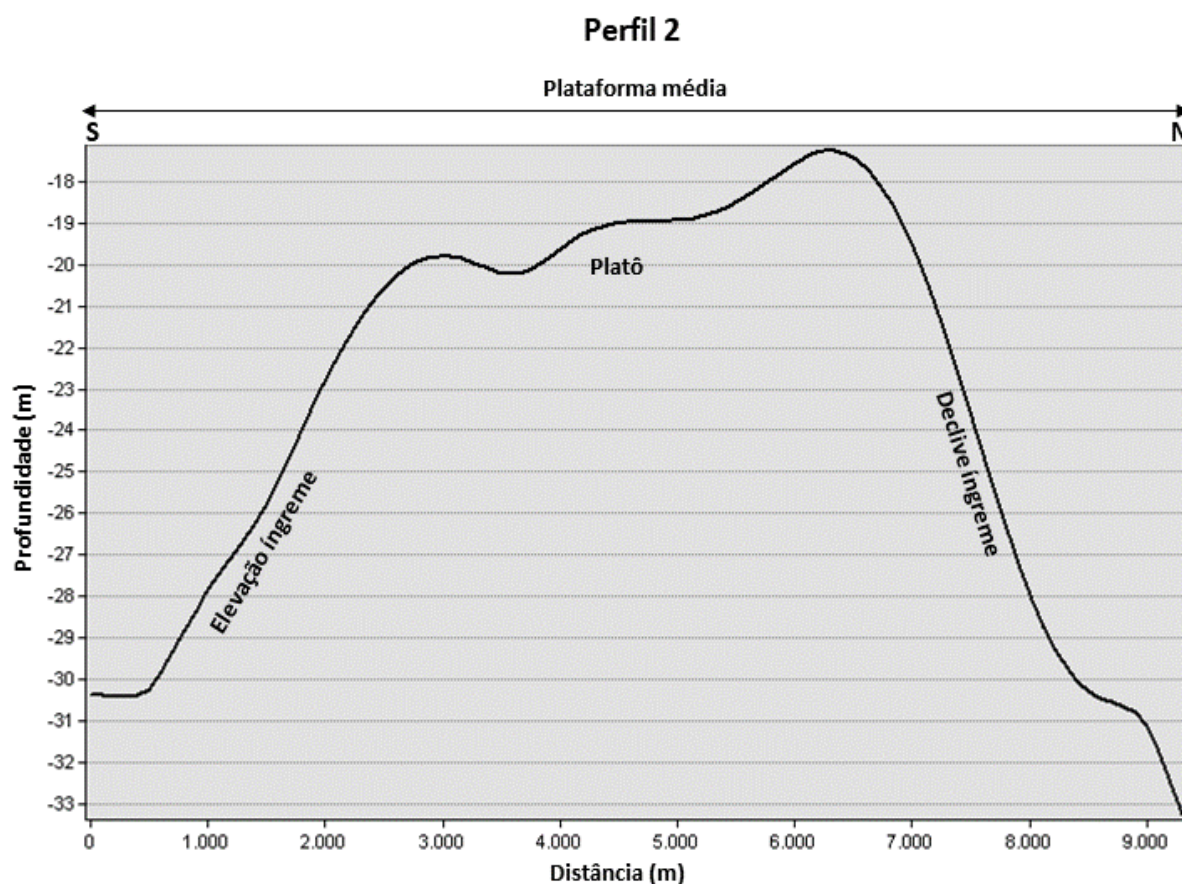


Figura 21: Perfil batimétrico dois na plataforma média e sua geomorfologia.

O perfil 3 (Figura 22) tem aproximadamente 55 km de comprimento e compreende as plataformas interna, média e externa. A plataforma interna nesse perfil apresenta aproximadamente 21 km de extensão e é marcada por uma planície, ao final da qual encontra-se a plataforma média (7,4 km extensão), com um declive suave, logo em seguida encontra-se a plataforma externa (27 km extensão) relativamente plana seguida da quebra da plataforma.

O perfil 4 (Figura 23) tem aproximadamente 60 km de extensão, onde 27,6 km pertencem a plataforma interna, 12 km a plataforma média e 20,4 km a plataforma externa. A plataforma interna é representada por uma planície com altos e baixos relevos e um declive suave que se segue até o final da plataforma média, onde declives íngremes marcam o início e o fim da plataforma externa.

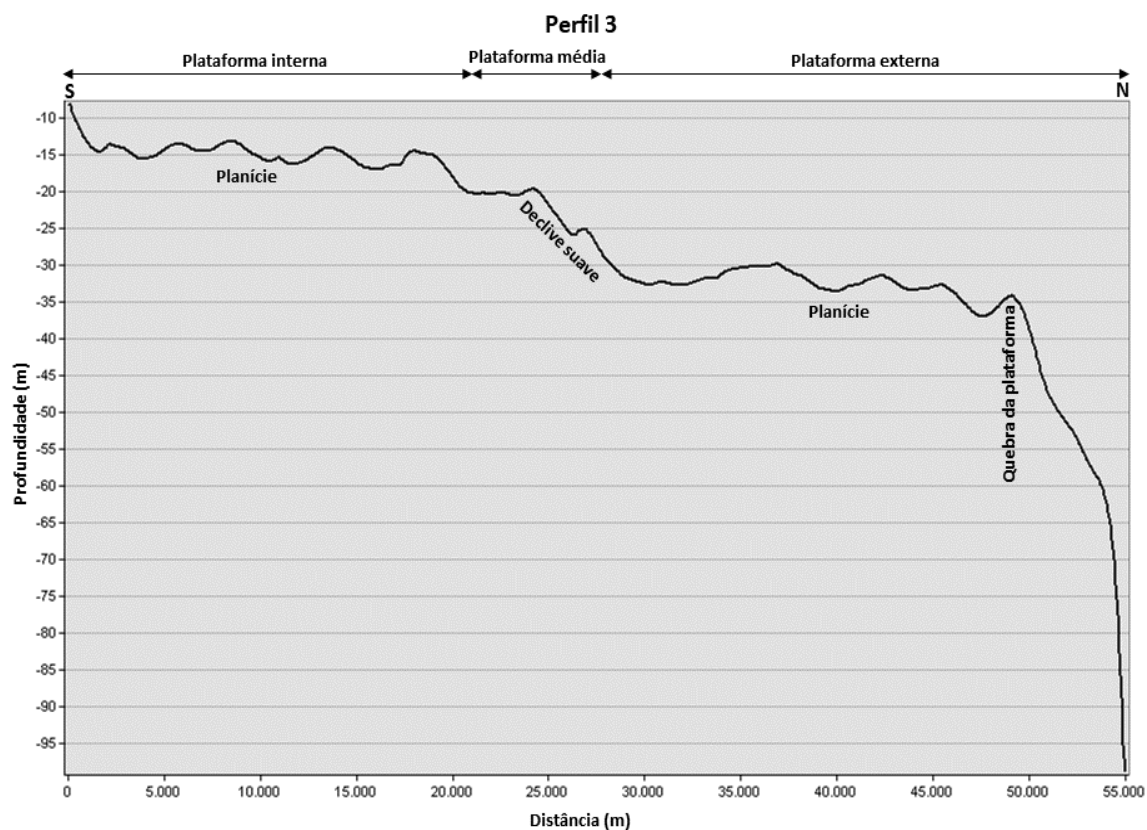


Figura 22: Perfil batimétrico três indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.

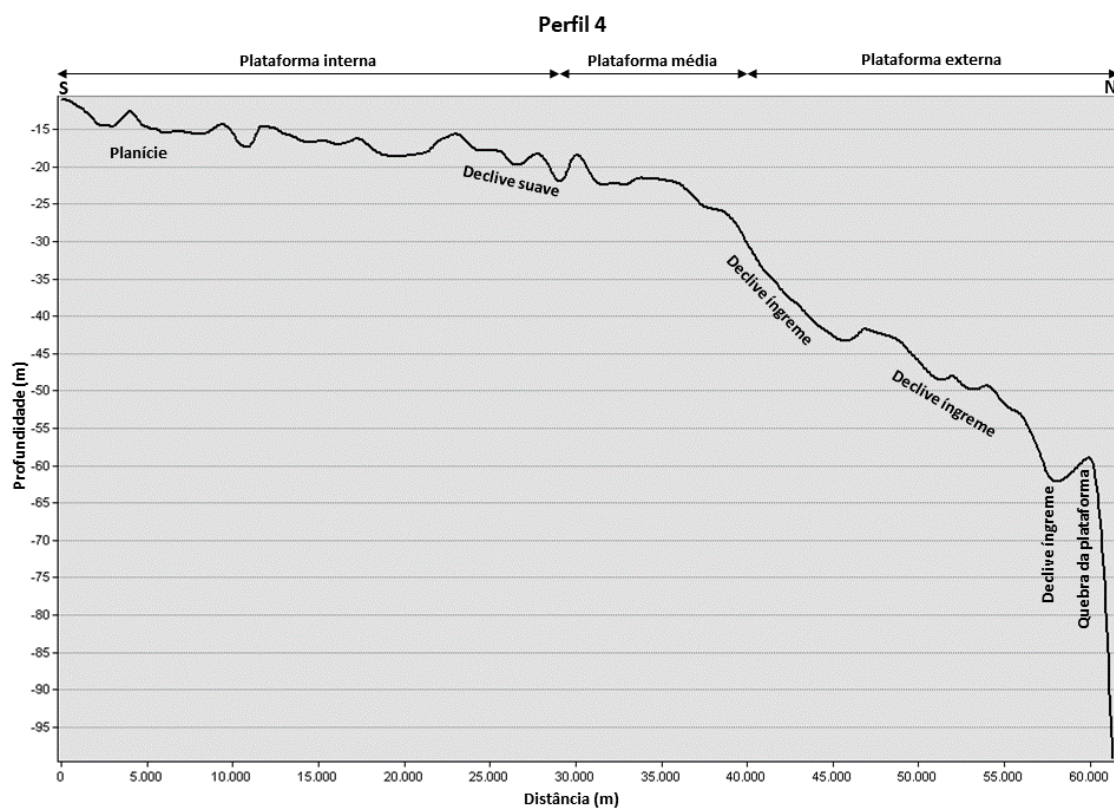


Figura 23: Perfil batimétrico quatro indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.

O perfil 5 (Figura 24) apresenta 15 km de extensão totalmente inserido na plataforma interna, com altos e baixos relevos com diferença de alturas entre 2.5m a 3m, seguidos por um declive suave e outro íngreme.

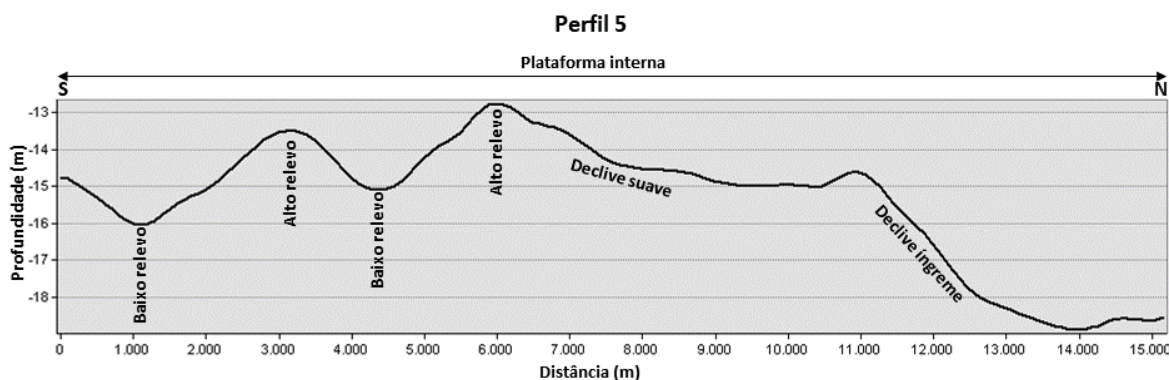


Figura 24: Perfil batimétrico cinco indicando a presença da plataforma interna e sua geomorfologia.

O perfil 6 (Figura 25) tem 18 km e foi dividido entre as plataformas interna e média, com 9 km cada. A plataforma interna apresenta baixos e altos relevos com diferença de altura de 2,5 m, seguidos de um declive íngreme de 10 m de profundidade, que marca a passagem da plataforma interna para a plataforma média. A plataforma média apresenta baixos relevos e um declive suave.

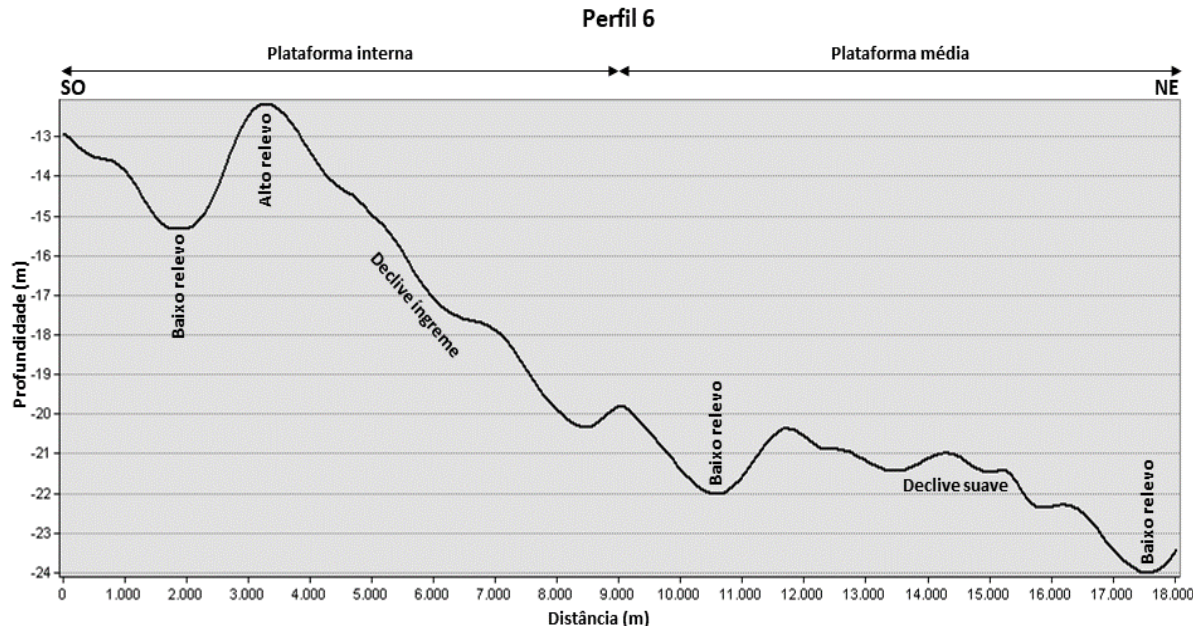


Figura 25: Perfil batimétrico seis indicando a presença das plataformas interna, média e sua geomorfologia.

O perfil 7 (Figura 26) tem aproximadamente 11 km e encontra-se inserido entre as plataformas interna e média. Nesse perfil a plataforma interna mediu 2 km de extensão, marcada pela presença de uma planície; já a plataforma média mediu 9 km e apresentou a presença de uma depressão de aproximadamente 7 m de profundidade.

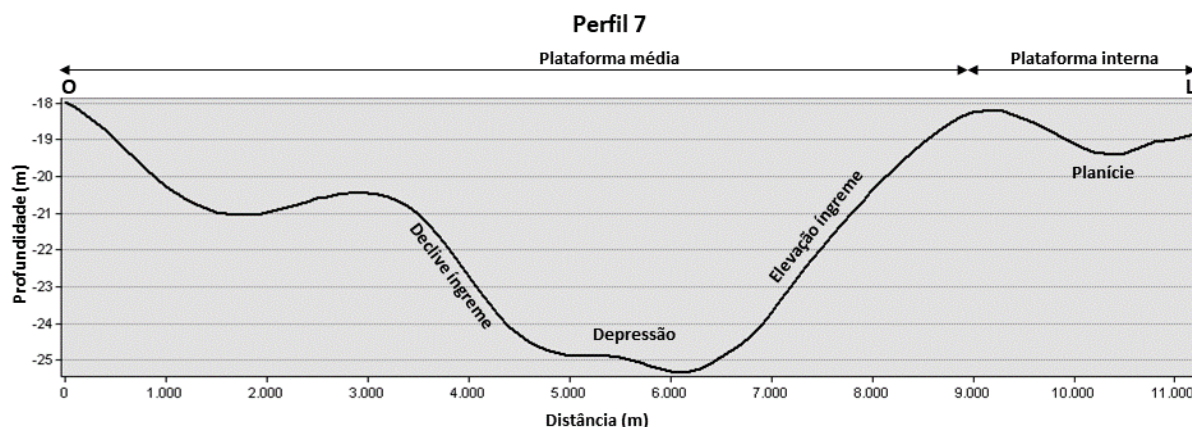


Figura 26: Perfil batimétrico sete indicando a presença das plataformas interna, média e sua geomorfologia.

O perfil 8 (Figura 27) está totalmente inserido na plataforma interna e apresentou 25 km de extensão. Esse perfil foi marcado por altos e baixos relevos com diferença de altura entre 4 e 2 m, além da presença de uma planície, declives e elevações íngremes.

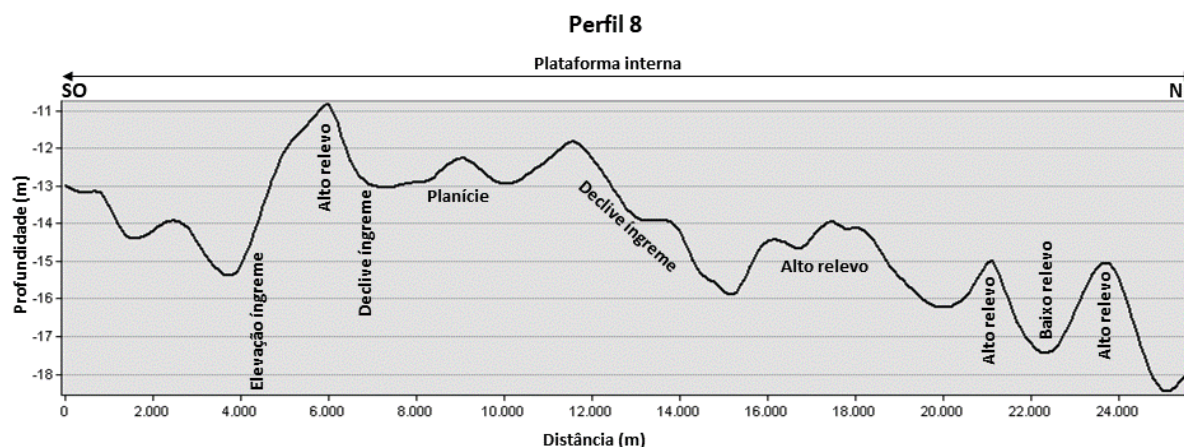


Figura 27: Perfil batimétrico oito indicando a presença da plataforma interna e sua geomorfologia.

O perfil 9 (Figura 28) tem 65 km de extensão e abrange toda a plataforma continental. A plataforma interna tem aproximadamente 30 km de extensão e é marcada pela presença de planícies, altos e baixos relevos, uma elevação e um declive íngreme. A plataforma média mediu aproximadamente 15 km, marcada por um declive suave, ao final da qual encontra-se um declive íngreme que dá início a plataforma externa, que mediu 20 km de extensão e é marcada por declives íngremes e baixos relevos, ao final do perfil pode-se observar a quebra da plataforma marcada por um alto relevo.

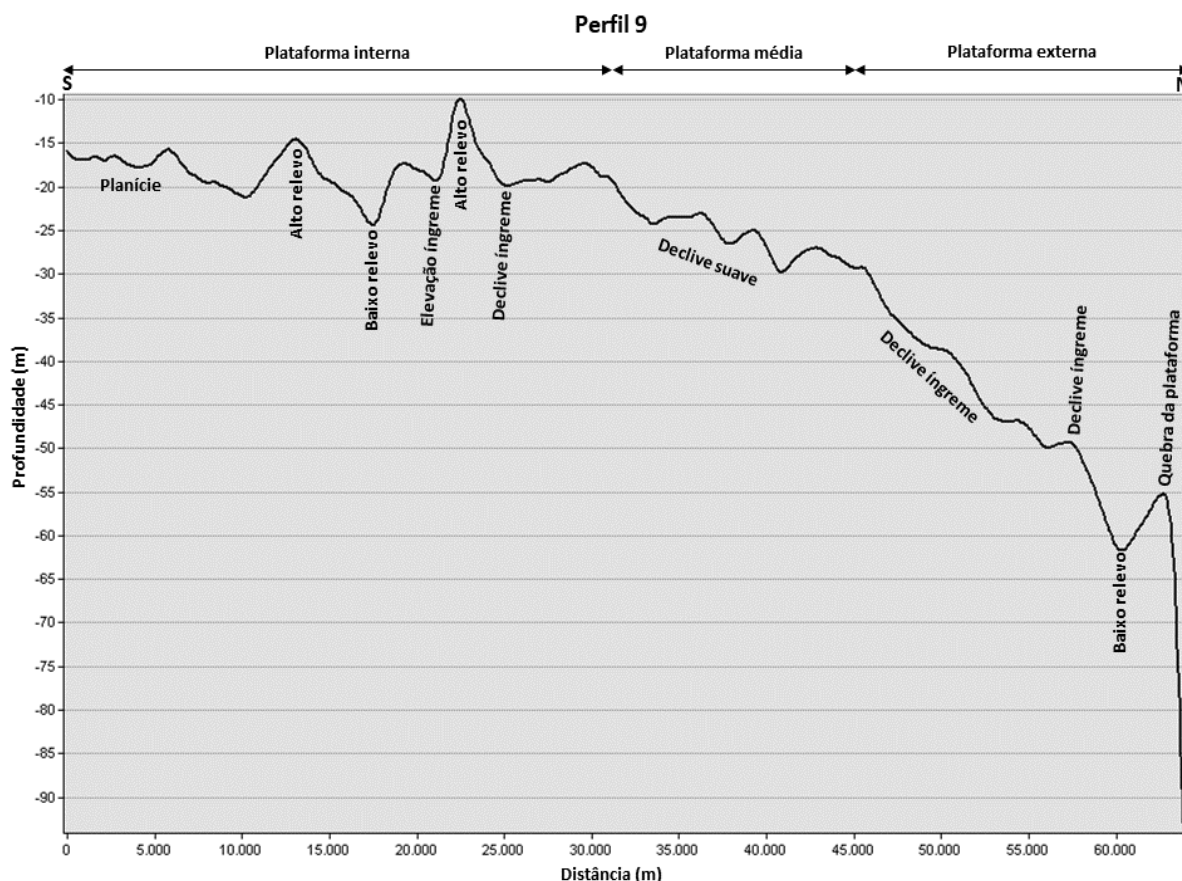


Figura 28: Perfil batimétrico nove indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.

O perfil 10 (Figura 29) tem aproximadamente 60 km de extensão e abrangeu a plataforma interna, média e externa. A plataforma interna apresentou 29 m de extensão, marcada pela presença de uma planície, altos e baixos relevos com diferença de alturas entre 10 m a 15 m, além de elevações e declives íngremes e um declive suave. O início da plataforma média foi representado por um declive suave que logo se torna íngreme, com extensão média de 4 km, após ela vem a plataforma externa com 27 km de extensão, representada por declives íngremes e suaves, e alto relevo marcando a quebra da plataforma continental.

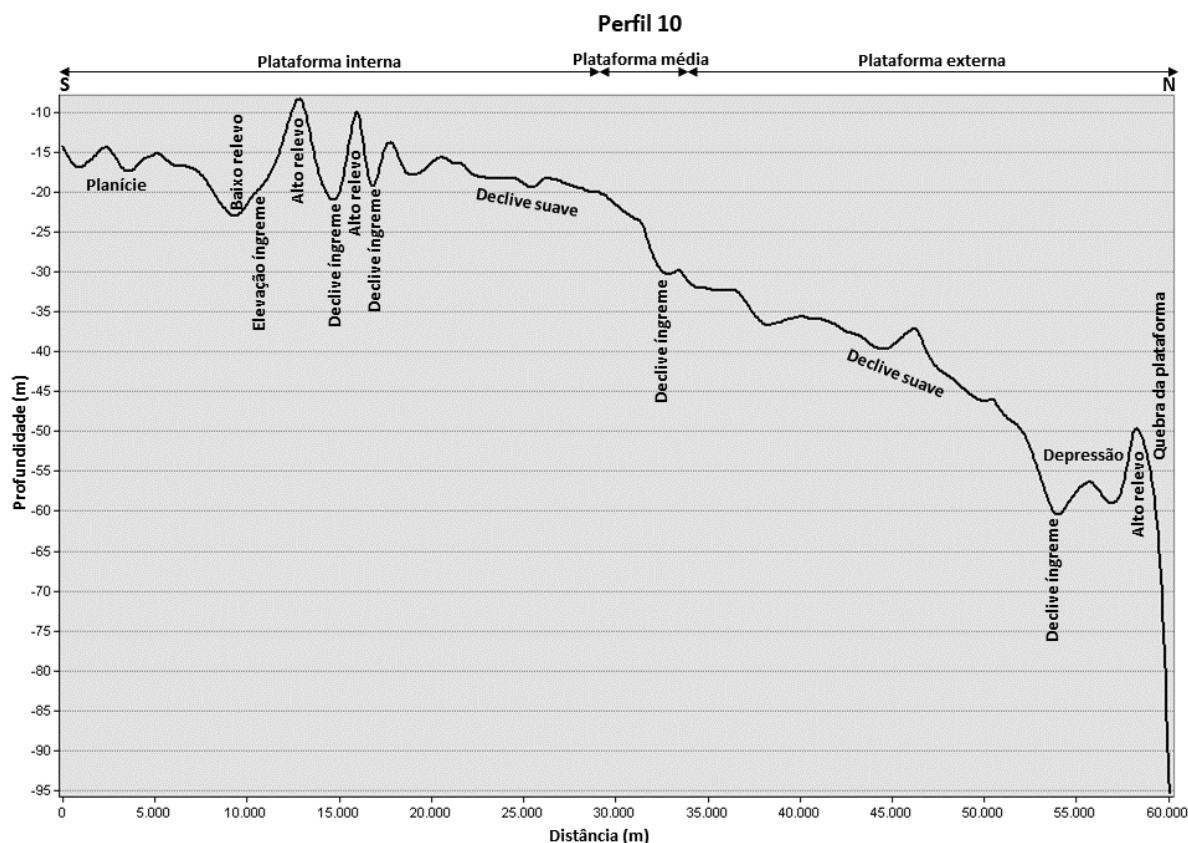


Figura 29: Perfil batimétrico dez indicando a presença das plataformas interna, média, externa e sua geomorfologia.

5.2. Discussões

Foi observado no mapa de batimetria (Figura 14) e direção de declive (Figura 16) a grande ocorrência de lineamentos com direção preferencial SO – NE; esses lineamentos foram relacionados a antigos canais e paleocanais na região, que possivelmente estão relacionados a antigos percursos do rio Parnaíba (AQUINO DA SILVA *et al.*, 2016).

Na figura 30 de Aquino da Silva (2016) é possível visualizar a presença de canais e vales incisos em formato de U e V, os canais em formato de U aparecem na área mais perto do RP e são mais largos e mais rasos quando comparados aos vales em formato de V que ocorrem mais a Oeste da área. O formato de U indica sua fase juvenil (MACHADO *et al.*, 2004).

Segundo HOLZ (2003) e KIM e MONTAGNA (2012) a parte mais a oeste do DRP é composta por um sistema de canais de maré com condições lagunares estuarinas; AQUINO DA SILVA (2016) por sua vez, infere que a presença de vales incisos (Figura 30) em ambos os lados (leste e oeste) seria uma indicação de que a área do delta se estendia de Tutoia a leste da foz do rio Igarauçu.

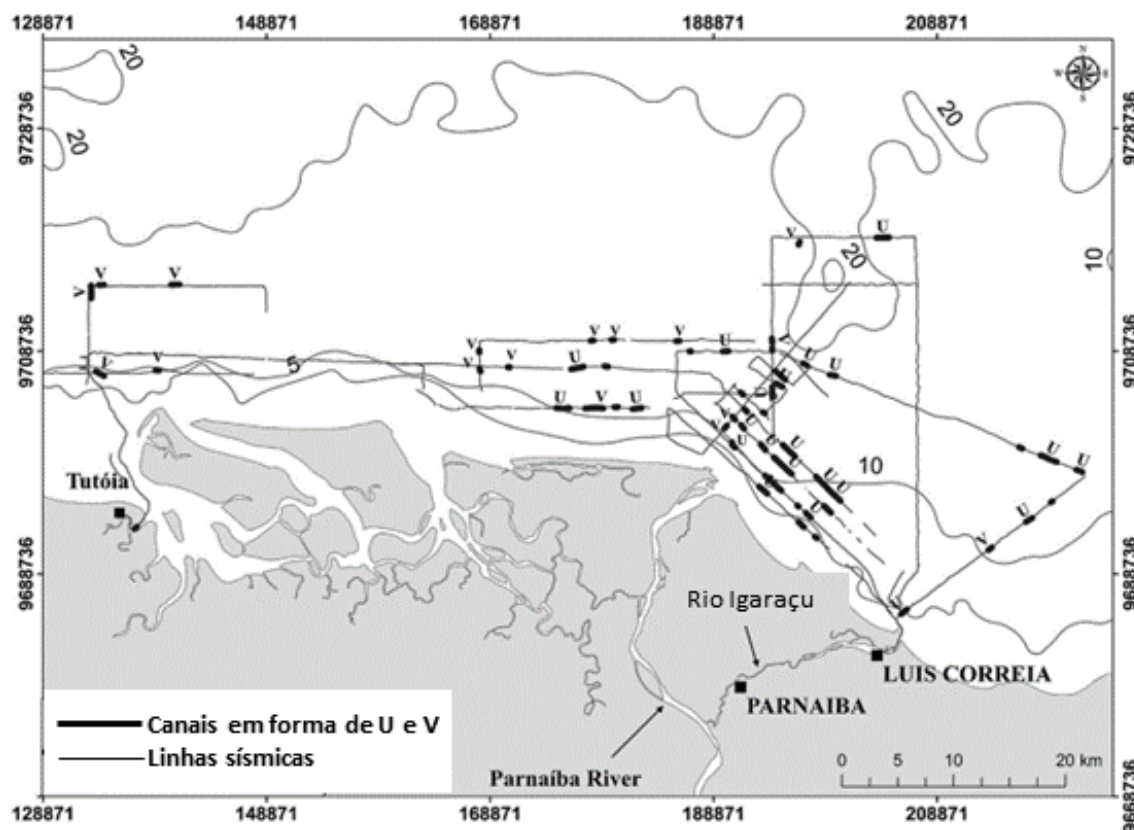


Figura 30: Mapa de localização dos canais (U) vales incisos (V) identificados ao longo das linhas sísmicas.

Conforme o rio Parnaíba foi migrando para sua atual posição, ele foi escavando esses vales e entre eles formou-se altos relevos. No mapa da figura 18 foi observado que os sedimentos desses altos relevos com direção NO – SE são constituídos principalmente de areia fina a média, biodetrítica, com conchas e quartzo, o que mostra que provavelmente essa área representaria um campo de dunas subaquosas ou bancos arenosos. Na parte mais a oeste a composição é de areia fina com lama, areia biodetrítica e areia terrígena, que poderiam estar relacionadas a passagem de um antigo rio cuja planície costeira foi afogada pelo atual nível do mar (MARTINS e NUNES, 2007), indício da presença de antigos percursos do RP.

A plataforma interna observada nos dez perfis gerados, apresentam média de 22 km de extensão e profundidade média de 12 m. A passagem da plataforma interna para média na porção nordeste do Piauí ocorre em torno de 20 m como previsto na literatura (VITAL *et al.*, 2005, 2023; FREIRE *et al.*, 2009).

Os perfis traçados na plataforma média, apresentam extensão média em torno de 12 km e profundidade média de 21 m; a passagem para a plataforma externa se dá entre 35 e 40 m de profundidade, também em concordância com a literatura (VITAL *et al.* 2005, 2010; FREIRE

et al., 2009), esse valor tende a ser menor mais a leste, quando se aproxima do estado do Ceará, onde FREIRE *et al.*, (2009) compartimenta a plataforma em apenas interna e externa.

A extensão média encontrada para a plataforma externa foi de 29 km e profundidade entre 35-40 m a 50-60m. Um pouco mais rasa que o previsto por VITAL *et al.*, (2005) e FREIRE *et al.*, (2009).

Os valores de extensão para as plataformas foram diferentes do esperado, isso se deve ao fato de que as medidas realizadas pelo programa de avaliação do potencial sustentável de recursos vivos na zona econômica exclusiva (REVIZEE) vão desde a linha de costa até a quebra da plataforma e os dados utilizados nesta pesquisa começam a partir da isóbata de 10 m que fica acerca de 7 m da linha de costa, além do fato das médias desta pesquisa serem calculadas a partir dos 10 perfis traçados, deixando assim uma grande área sem medidas.

A plataforma interna apresenta uma variedade de feições geomorfológicas e concentra a maior parte das amostras sedimentológicas presentes na área, sua composição é basicamente areia quartzosa e lama (VITAL *et al.*, 2005; FREIRE *et al.*, 2009 e GOES, 2018). Essa parte da plataforma apresenta um relevo suave que mostra algumas irregularidades (altos e baixos relevos) devido à grande presença de canais, bancos de areias, campos de dunas e possíveis recifes presentes nessa região, essas feições se assemelham as descritas por VITAL *et al.* (2005), FREIRE *et al.* (2009), GOES (2018) e LISNIEWSKI (2020).

A plataforma média apresenta um relevo mais íngreme e com a presença de declives que marcam a passagem da plataforma interna, para a plataforma média. Segundo VITAL *et al.*, (2005), a plataforma média é recoberta por sedimentos grossos de origem biogênica.

Nessa região é possível observar a presença de alguns altos relevos (Figura 19 e seus respectivos perfis, figuras 20 e 21) que diferem dos demais por terem uma extensão mais ampla, tais feições se assemelham a platôs, como os descritos por Araújo (2018). Entretanto, estudo de maior detalhe realizado por DIAS *et al.*, (2021), com imagens de satélite de alta resolução e vídeos com drop-camera em uma área próxima ao local de estudos desse trabalho (Figura 31, parte 1), indicam que esses altos relevos poderiam estar relacionados a uma grande concentração de pináculos recifais rasos, constituídos por colônias esparsas de corais fixos

sobre estruturas rígidas (CASTRO & PIRES, 2001) formadas (cobertas) por incrustações de algas calcárias sobrepostas.

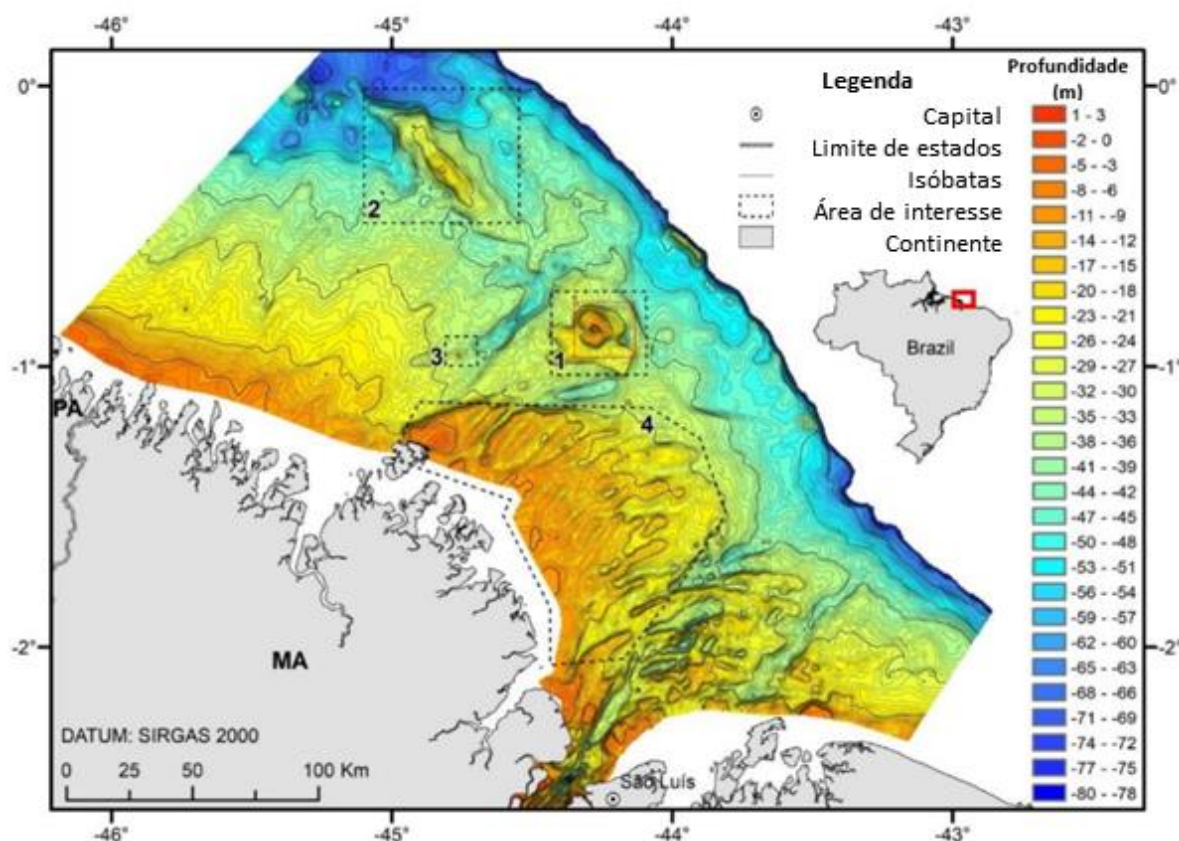


Figura 31: Mapa batimétrico mostrando a localização dos recifes regionais Manoel Luiz-1 e Alvaro Bank-2 (ocorrências de corais), Tarol Bank-3 (calcários algas tipo maerl) e as Margens do Cururupu-4 (ondas de areia quartzosa) adjacentes à costa (DIAS et al 2021).

Além dos altos relevos de extensão mais ampla, também foi possível visualizar uma depressão que foi associada ao canal Parnaíba (Figura 32). Presente antes da quebra da plataforma, esse canal está diretamente ligado ao continente, pois de acordo com FRANÇA (1976) e SUMMERHAYES *et al.*, (1976), a drenagem continental em períodos de níveis do mar mais baixos que o atual está diretamente relacionado aos relevos negativos.

A plataforma externa com relevos íngremes e cheios de irregularidades, é descrita por VITAL *et al.*, (2005) e FREIRE *et al.*, (2009) como composta por areias e lamas biodetríticas e cascalhos de algas. As irregularidades presentes aqui estão relacionadas ao aumento de profundidade em direção a quebra da plataforma, além dos bancos de areia presentes no local. A presença frequente de zonas elevadas na borda da plataforma (Perfis 1, 4, 9 e 10), possivelmente estaria relacionada a um menor afluxo de sedimentos terrígenos, permitindo a proliferação de organismos que compõe a fábrica de carbonatos, como demonstrado em outras áreas da margem brasileira (e.g. GOMES *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2020; VITAL *et al.*,

2023). A exposição subaérea desses sedimentos carbonáticos seria responsável pela geração de um relevo cárstico nessas áreas da plataforma.

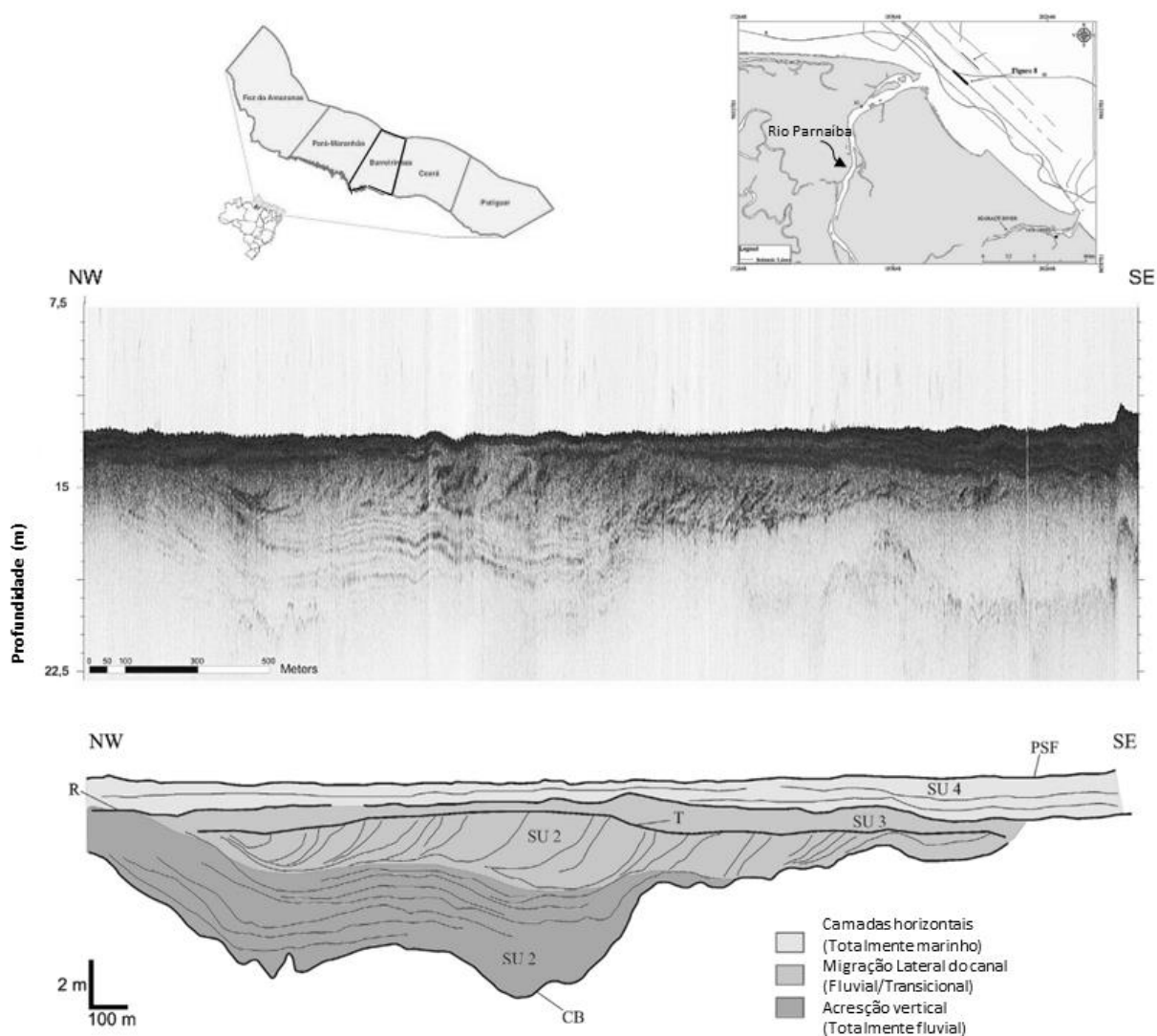


Figura 32: Perfil sísmico localizado sobre a bacia de barreirinhas revelando um canal em forma de U com estruturas internas mostrando acreção vertical na base, migração lateral da barra pontiaguda concordantemente acima do SU2, refletores caóticos em SU3 e camadas horizontais em SU4 (Adaptado de Aquino, 2015 e ANP, 2015).

Considerações finais

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da construção e análise do mapa batimétrico utilizando-se o método de interpolação krigagem e da análise de seus derivados, mapa de declividade e do mapa de direção de declividade, foi possível uma melhor visualização das formas de relevo presentes na plataforma adjacente ao delta do rio Parnaíba (PI/MA). Para melhor interpretação dos mapas, a plataforma foi dividida em: plataforma interna, plataforma média e plataforma externa, respectivamente com extensão de 22, 12 e 29 km. A quebra da plataforma foi observada entre 50-60 m de profundidade.

Para melhor compreensão da geomorfologia da região, foram construídos dez perfis batimétricos ao longo da área de estudo, dos quais os perfis 1, 3, 4, 9 e 10 cobrem as três subdivisões (interna, média e externa) da plataforma, os perfis 5 e 8 cobrem apenas a plataforma interna, os perfis 2 e 7 cobrem a plataforma média e o perfil 6 cobre as plataformas interna e média.

A partir dos perfis traçados foi possível a identificação das feições presentes na área. Na plataforma interna foi observado a presença de planícies, bancos de areia, possíveis recifes e canais, com sedimentos constituídos basicamente por areia quartzosa e lama; já para a plataforma média foi encontrado a presença de declives íngremes, altos e baixos relevos, platôs associados a afloramentos rochosos e vales. Essa porção da plataforma é recoberta por sedimentos grossos de origem biogênica. Na plataforma externa foi encontrado a presença de relevos íngremes e cheios de irregularidades, apresentando altos e baixos relevos, com um substrato composto por areias e lamas biodetríticas e cascalhos de algas.

A presença dos canais, vales, bancos de areia, dunas subaquosas e demais feições, indicam uma intensa modificação na direção e hidrodinâmica local. Dessa forma a integração do mapa batimétrico com seus derivados, declividade e direção da declividade, associado a informações sedimentológicas, permitiram a visualização das feições geomorfológicas e do substrato marinho pertencentes a plataforma continental adjacente ao delta do rio Parnaíba.

Os resultados mostram ainda a ausência de dados científicos para essa porção da margem continental brasileira, cuja ampliação é necessária para a cartografia e caracterização adequada do fundo do mar, de forma a permitir a gestão adequada e a exploração sustentável dos recursos minerais e energéticos.

7. REFERÊNCIAS

- ANDRADE JR., A.S.; BASTOS, E.A.; BARROS, A.H.C.; SILVA, C.O., AND GOMES, A.A. 2005. Classificação climática e regionalização do Semi-Árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. *Revista Ciência Agronômica*, 36(2), 143–151.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 1998. Bacia de Barreirinhas. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/11a-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/seminarios/bacia_de_barreirinhas.pdf.
- AQUINO DA SILVA, A.G. 2015. The Parnaíba River Delta – from modern hydro and morphodynamics to sea level change.
- AQUINO DA SILVA, A.G. STATTEGGER, K., SCHWARZER, K., VITAL, H. 2015. The influence of climatic variations on River delta hydrodynamics and morphodynamics in the Parnaíba delta. *J. Coast. Res.* 31 (4), 930e940.
- AQUINO DA SILVA, A.G. STATTEGGER, K., SCHWARZER, K., VITAL, H. 2016. Seismic stratigraphy as indicator of late Pleistocene and Holocene sea level changes on the NE Brazilian continental shelf. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 188-197.
- ARAÚJO, M.V. 2011. Modelo Batimétrico da Plataforma Continental Interna de Acaraú – Ceará – Brasil. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, INPE 7682-7689p.
- ARAUJO, I.R.F. 2018. Platô do Ceará: Uma Plataforma Carbonática Isolada e Afogada da Margem Equatorial Brasileira. *Dissertação de Mestrado em Geodinâmica e Geofísica* - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 116p.
- AZEVEDO, R. 1993. Tectonic evolution of Brazilian equatorial continental margin basins. PhD, thesis. Imperial College, London, 455p. 10.1306/D9CB69C5-1715-11D7-8645000102C1865D.
- AYRES NETO, A. 2001. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Brazilian Journal Of Geophysics*. 18: 241-255.
- BAPTISTA NETO, J.A., PONZI, V. R. A., SICHEL, S. E. 2004. *Introdução à Geologia Marinha*. Interciência, Brasil, Rio de Janeiro, 284p.

- BHATTACHARYA, J., GIOSAN, L. 2003. Wave-influenced deltas: Geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*. 50: 187 - 210. 10.1046/j.1365-3091.2003.00545.x.
- BITTENCOURT, A. C. S. P., DOMINGUEZ, J. M. L. & MOITA FILHO, O. 1990. Variações texturais induzidas pelo vento nos sedimentos da face da praia (Praia de Atalaia, Piauí). *Revista Brasileira de Geociências* 20:201-207.
- BITTENCOURT, A.C.S.P., DOMINGUEZ, J.M.L., MARTIN, L., SILVA, I.R. 2005. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: An overview. *Marine Geology*, 219: 219–234.
- NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Bottom coverage by survey method. 2022. https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/hydro_survey/three_survey_methods_650.html. Acesso em 12 de fevereiro de 2023.
- CAMPOS, R. Plataforma Continental. Disponível em: <http://zonacosteira.bio.ufba.br/plataforma.html>. Acesso em: 04 dez. 2021.
- CARTA NAÚTICA 21700 – MARINHA DO BRASIL. 2019. <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-cartas-raster-361>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2023.
- CAROZZI, A.V., FALKENHEIN, F.U.H., CARNEIRO, R.G., ESTEVES, F.R., CONTREIRAS, C.J.A. 1975. Análise ambiental e evolução tectônica sin-sedimentar da seção siluro-eocarbonífera da Bacia do Maranhão. Exploração de Petróleo - PETROBRAS 7. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, Divisão de Informação Técnica e Patentes.
- CASTRO C.B., PIRES D.O. 2001. Brazilian coral reefs: what we already know and what is still missing. *Bulletin of Marine Science*, 69: 357-371.
- CHM – CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA DO BRASIL. Norma para lançamento da profundidade. <https://www.marinha.mil.br/chm/>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2022.
- CHIAO, L.Y, CHEN, Y, N, GUNG, Y. 2014. Constructing empirical resolution diagnostics for kriging and minimum curvature gridding. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*.

- Taiwan, p. 3939-3954. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2013JB010364>. Acesso em: 13 jan. 2023.
- CONDÉ, V.C., LANA, C.C., NETO, O. C. P., ROESNER, E. H., NETO, J. M., DUTRA, D. C. 2007. Bacia do Ceará. *Boletim geociências Petrobras* 15: 347-355.
- CORRÊA, I. C. S. 2022. Metodologia para Análise Morfoestrutural de Áreas Continentais e Marinhas. Porto Alegre: Ufrgs, 78p.
- CPRM. 2000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Luís SW/NW, Folhas SA.23-V e SA.23-Y. Estados do Pará e Maranhão. Escala 1:500.000./ organizado por Herbert Georges de Almeida. – Brasília: CPRM, 2000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br>.
- DIAS G.T.M., SILVA R.C.O., SANTOS FILHO J.R. 2021. Manoel Luiz Reefs morphology unveiled by high resolution satellite images (North Brazilian Continental Shelf). *Quaternary and Environmental Geosciences* 12:46-59.
- FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.8, p.123-131.
- FIGUEIREDO, M.F., RAJAGABAGLIA, G.P. 1986. Sistema classificatório aplicado às bacias brasileiras. *Revista Brasileira de Geociências*, 16: 351–369.
- FERREIRA LC, BASTOS AC, AMADO FILHO GM et al 2020 Chapter 30 - Submerged reefs in the Abrolhos Shelf: morphology and habitat distribution In: Peter Harris Elaine Baker. (Org.). *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat*. 2aed. Berlim: Elsevier, p. 519-532. DOI: 10.1016/B978-0-12-814960-7.00030-0.
- FRANÇA, A.M.C. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 6: 71–88.
- FREIRE, G. S. S., MANSO, V.A.V., SILVA FILHO, W. F., GOMES, O. F., LIMA, S. F., SERGIO BEZERRA, R. P., ARAÚJO, T. C. M., OLIVEIRA, P. P. R. 2009. Programa REVIZEE - Score Nordeste: oceanografia geológica - Sedimentologia e morfologia da margem continental do nordeste do Brasil. Fortaleza: Martins & Cordeiro, 248 p. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/pt-br/psrm/revizee>. Acesso em: 12 dez. 2022.

- GALLOTTI, T. F. 2008. Geomorfologia - Conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 322p.
- GALLOWAY, W. 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system. Society of Economic Paleontologists and Mineralogist (SEPM), Special Publication No. 31: 127-156.
- GARCIA, K. B. L. 2021. Morfologia e sedimentação da plataforma do atol das rocas. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 52p.
- GÓES, A.M.O., SOUZA, J.M.P., TEIXEIRA, L.B. 1990. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, 4: 55-64.
- GÓES, A.M., FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobrás, 8: 57-67.
- GOES, E. R. 2018. Mapeamento preditivo dos habitats marinhos na plataforma continental interna adjacente aos municípios de Paulista e Olinda (PE). Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 73p.
- GOMES, M.P.; VITAL, H.; SILVA, L.L.N.; EICHLER, P.P.B.; ROVIRA, D. ; LONGO, G. O. 2020. Nature and condition of outer shelf habitats on the drowned Açú Reef, NE Brazil. In: Peter Harris; Elaine Baker. (Org.). Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat. 2aed.Berlin: Elsevier, v. 1, p. 571-585.
- GEOSOFT. Oasis Montaj - Manual do Curso: gridagem com o método de krigagem. Disponível em: <https://www.seequent.com/>. Acesso em: 02 dez. 2022.
- GROTZINGER, J. Transporte fluvial: das montanhas aos oceanos. In: GROTZINGER, J; JORDAN, T. PARA ENTENDER A TERRA. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Cap. 18. p. 1-881.
- GREENE, H.G., BIZZARRO, J.J., O'CONNELL, V.M., AND BRYLINSKY, C.K. 2007. Construction of digital potential marine benthic habitat maps using a coded classification scheme and its application, in Todd, B.J., and Greene, H.G., eds., Mapping the Seafloor for Habitat Characterization: Geological Association of Canada, Special Paper 47, p. 141-155.

- HAMBLIN, W. K.; CHRISTIANSEN, E.H. 2012. *Earth's Dynamic Systems*. 10. ed.: Pearson, 2012. 816 f. 10 v.
- HOLZ, M. 2003. Sequence stratigraphy of a lagoonal estuarine system—An example from the lower Permian Rio Bonito Formation, Paranaíba Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 162: 305–331.
- KIM, H.C., MONTAGNA, P.A. 2012. Effects of climate-driven freshwater inflow variability on macrobenthic secondary production in Texas lagoonal estuaries: A modeling study, *Ecological Modelling*, 67-80, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.03.022>.
- LANDIM, P.M.B. 2000. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 20p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso dia: 05 de janeiro de 2023.
- LIMA, S. F. 2006. Caracterização geomorfológica e paleogeográfica da plataforma continental adjacente a foz do Rio Apodi-Mossoró, RN/Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN. Natal, 109p.
- LINS, R.C. 1978. Bacia do Parnaíba: aspectos fisiográficos. Recife, Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais. 65p.
- LISNIEWSKI, M. A. 2020. Caracterização de potenciais habitats bentônicos na elevação do rio grande. Tese de Doutorado - Curso de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 127p.
- MACHADO, L. C. R.; KOWSMAN, R. O.; ALMEIDA JR, W.; MURAKAMI, C. Y.; SCHREINER, S.; MILLER, D. J.; PIAUILINO, P. O. V. 2004. Geometria da porção proximal do sistema deposicional turbidítico moderno da Formação Carapebus, Bacia de Campos; modelo para heterogeneidades de reservatório. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.12, p. 287-315.
- MACHADO JR, *et al.*, 2004. Considerações acerca de Trabalhos em Áreas de Divisa de Fusos UTM. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC, Florianópolis. Outubro, 2004.

- MACHADO, L.A.F. 2015. A plataforma continental brasileira e o direito do mar: Considerações para uma ação política. Tese (Doutorado) - Curso de Altos Estudos, Rio Branco, Brasília.m174p.
- MARTINS, L.R; NUNES J.C. 2007. Granulados Marinhos Terrígenos. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Porto Alegre, 5: 39-46.
- MAYER L., JAKOBSSON M., ALLEN G., DORSCHER B., FALCONER R., FERRINI V., LAMARCHE G., SNAITH H., WEATHERALL P. 2018. The Nippon Foundation—GEBCO Seabed 2030 Project: The quest to see the world’s oceans completely mapped by 2030. *Geosciences*, 8, 63.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2006. Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba. Brasília: MMA.
- NIPPON FOUNDATION-GEBCO SEABED 2030 PROJECT. <https://seabed2030.org/>. Acesso em 14 de fevereiro de 2023.
- OLIVEIRA, P. R. O. 2009. Caracterização morfológica e sedimentológica da plataforma continental brasileira adjacente aos municípios de Fortim, Aracati e Icapuí – CE. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, 133p.
- ORTON, J.G., READING, H.G. 1993. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology*, 40: 475–512.
- PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L., MCMAHON, T.A. 2007. UNDATED WORLD MAP OF THE KÖPPEN-GEISER CLIMATE CLASSIFICATION. *HYDROL. EARTH SYST. SCI.* 11: 1633-1644.
- READING H.G. 1996. *Sedimentary environments: processes, facies, and stratigraphy*. 3.ed. Oxford: Blackwell Science. University of Oxford.
- REGALI, M.S.P., UESUGUI, N., LIMA, E.E.C. 1985. Palinoestratigrafia e paleoambiente da Bacia de Barreirinhas Maranhão-Brasil. Rio de Janeiro: DNPM, Coletânea de trabalhos paleontológicos, 461-470p.
- RESCK, R. P., BEZERRA NET, J. F., COELHO, R. M. P. 2007. Nova batimetria e avaliação de parâmetros morfométricos da Lagoa da Pampulha (Belo Horizonte, Brasil). *Geografias ARTIGOS CIENTÍFICOS*, 3:17-23.

- SANTOS FILHO, F. S. Composição florística e estrutural da vegetação de restinga do estado do Piauí. 2009. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Botânica, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 124p.
- SEABEDMAP 2020. Projeto Integração e Análise de Informações Digitais no Mapeamento Geológico Marinho – SeabedMap (MCTI/ FINEP/ AT Materiais Avançados e Minerais Estratégicos 2020). UFRN/SECIRM/Marinha do Brasil/SGB/UFC/IEPA. 57p.
- SILVA FILHO, W. S, CASTRO, D.L., CORREA, I.C.S, FREIRE, G.S.S.. 2007. Estruturas Rasas na Margem Equatorial ao Largo do Nordeste Brasileiro (Estado Do Ceará): Análise de Relevo e Anomalias Gravimétricas Residuais. Revista Brasileira de Geofísica 25(Supl. 1): 65-77. ISSN 0102-261X.
- SOUZA, J. M. 1999. Mar territorial, zona econômica exclusiva ou plataforma continental? Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, 17: 79-82.
- SUMMERHAYES, C.P., FAINSTEIN, R. & ELLIS, J.P. 1976. Continental margin off Sergipe and Alagoas, Northeast Brazil: a reconnaissance geophysical study of morphology and structure. Marine Geology, 20: 345–361.
- TESSLER, M. G., MAHIQUES, M.M. 2000. Processos oceânicos e a fisiografia dos fundos marinhos. IN: TEIXEIRA, W. et al. Decifrando a Terra. São Paulo, Oficina de Textos, 261-284p.
- TROSDTORF JUNIOR, ZALÁN, P. V.; FIGUEIREDO, J. de J. P. de; SOARES, E.F.2007. Bacia de Barreirinhas. Boletim de Geociência da Petrobrás, Rio de Janeiro, maio/nov. 2007. v. 15, n. 2, p. 331-339.
- UNCLOS – United Nations Convention on the Law of the Sea, 1982. Continental shelf. Disponível em: https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/convention_overview_convention.htm. Acessado em: 02 de janeiro de 2023.
- VAZ, P. T. et al. 2007. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.253-263.
- VITAL, H., ESTEVES, L., ARAÚJO, T. C. M., PATCHINEELAM, S. M. 2005. Oceanografia geológica e geofísica da plataforma continental brasileira. In: SOUZA, C.R.G. et al., Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos, Cap. 8. p. 153-175.

- VITAL H., GOMES M.P., TABOSA W. F., FRAZAO E.P., PLÁCIDO JUNIOR J.S., SANTOS C.L.A. 2010. Characterization of the Brazilian continental shelf adjacent to Rio Grande do Norte state, NE Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, p. 43-54.
- VITAL H., DOMINGUEZ J.M.L., BASTOS A.C., ARAUO T.C.M. (aceito). Geodiversity and Biodiversity of the Tropical Shelf of Northeastern Brazil. In: DOMINGUEZ J.M.L., KIKUCHI R.K.P., ARAUJO M., SCHWANBORN R., VITAL H. (Eds). *Tropical Marine Environments of Brazil*. SPRINGER. 10.1007/978-3-031-21329-8 2023.
- YANG, C. S., KAO, S. P., LEE, F. B., HUNG, P.S. 2004. Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0. In: *Proceedings of the XXth ISPRS congress*. p. 778-785.
- ZANOTTO, O., SZATMARI, P., 1987. Mecanismo de rifteamento da porção ocidental da margem norte brasileira, bacia do Pará-Maranhão. *Revista Brasileira de Geociências*, Rio de Janeiro, 17: 189-195.
- WEBBER, D. C; TAVARES, F; OLIVEIRA, F; UMMUS, M. E. 2015. Manual Técnico para Seleção de Áreas Aquícolas em Águas da União - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Ecobatimetria-simples-ou-monofeixe-Fonte-Adaptado-de_fig6_299265450 [accessed 03 Jan, 2023].

A N E X O

Artigo Submetido a Revista ABEQUA - Quaternary and Environment Geosciences

Geomorfologia da plataforma continental Nordeste adjacente ao delta do rio Parnaíba (PI - MA)

Geomorphology of the Northeast continental shelf adjacent to the Parnaíba river delta (PI - MA)

Resumo

O mapeamento das feições presentes nas plataformas continentais contribui para a interpretação adequada do ambiente oceânico, que pode ser usado para fins científicos, políticos e estratégicos, para apoio a gestão, para o desenvolvimento e preservação das áreas submersas em geral e para o futuro do nosso planeta. Esse estudo foi realizado na Margem Equatorial Brasileira, na plataforma em frente a área Delta do rio Parnaíba (PI-MA) e teve como objetivo principal o mapeamento de feições geomorfológicas nesta região através do uso de dados hidroacústicos (batimetria monofeixe), apoiado por dados sedimentológicos, obtidas no âmbito do Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Marinha do Brasil - BNDO. Em laboratório, os dados hidroacusticos foram interpolados utilizando-se os métodos da krigagem e o da mínima curvatura, onde o método da krigagem se mostrou mais eficiente na visualização das feições presentes na área. A integração, análise e interpretação dos dados resultou em uma variedade de mapas do substrato oceânico (e.g. batimétrico, slope, aspecto, sedimentológico) que podem ser utilizados como unidades biologicamente relevantes (e.g, declividade, orientação, curvatura e terreno, entre outros). Desta forma foi possível identificar uma cobertura sedimentar desde areia fina a areia grossa, areia com biodetritos, conchas e cascalho, presença de lama e areia quartzosa, cujo relevo associado a diferentes feições submersas, tais como bancos, dunas, vales submarinos, bem como a presença de platôs, associados a afloramentos rochosos e bancos recifais. Adicionalmente, lineamentos e paleovales na plataforma atual indicam o percurso que no passado o rio Parnaíba percorreu.

Palavras-chave: PLATAFORMA CONTINENTAL NORDESTE; MAPEAMENTO MARINHO, FEIÇÕES SUBMERSAS; BATIMETRIA MONOFEIXE.

Abstract

The mapping of the features present on the continental shelves contributes to the proper interpretation of the oceanic environment, which can be used for scientific, political and strategic purposes, to support management, for the development and preservation of submerged areas in general and for the future of our planet. This study was carried out on the Brazilian Equatorial Margin, on the shelf in front of the Parnaíba River Delta (PI-MA) and had as its main objective the mapping of geomorphological features in this region through the use of hydroacoustic data (single beam bathymetry), supported by sedimentological data, obtained within the framework of the Brazilian Navy's National Oceanographic Data Bank - BNDO. In the laboratory, the hydroacoustic data were interpolated using the kriging and minimum curvature methods, where the kriging method proved to be more efficient in viewing the features present in the area. The integration, analysis and interpretation of the data resulted in a variety of ocean substrate maps (e.g., bathymetric, slope, aspect, sedimentological) that can be used as biologically relevant units (e.g., inclination, orientation, curvature and terrain, among others). In this way, it was possible to identify a sedimentary cover ranging from fine sand to coarse sand, sand with biodebris, shells and gravel, the presence of mud and quartz sand, whose relief is associated with different submerged features, such as banks, dunes, submarine valleys, as well as the presence of plateaus, associated with rocky outcrops and reef banks. Additionally, lineaments and paleovalleys on the current shelf indicate the path that the Parnaíba River took in the past.

Keywords: NORTHEAST CONTINENTAL SHELF; SEABED MAPPING; SINGLE BEAM BATHYMETRY.

1. Introdução

Aproximadamente 70% da superfície do planeta terra se encontra abaixo do nível do mar e é ainda relativamente pouco conhecida (e.g. VITAL *et al.*, 2005; Mayer *et al.*, 2018). Os estudos nessa área são de extrema importância para o desenvolvimento científico, político e estratégico, preservação desses ambientes e para o futuro do nosso planeta.

Conhecer as profundidades dos fundos marinhos (batimetria), é de vital importância para uma variedade crescente de usos fundamentais para a compreensão do funcionamento da Terra (MEYER *et al.*, 2018). Os dados batimétricos também são críticos para estabelecer os limites da plataforma continental estendida sob a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (JAKOBSSON *et al.*, 2003), bem como suas subdivisões (e.g. interna, média e externa) e representam um conjunto de dados fundamentais para atender os crescentes desafios associados às mudanças climáticas (e.g. FENTY *et al.*, 2016, STOCKER *et al.*, 2013).

A porção submersa do planeta terra pode ser dividida em várias partes, porém o foco desse estudo será a plataforma continental da margem equatorial brasileira em frente ao delta do rio Parnaíba (DRP) (Figura 1a). O DRP ainda apresenta feições naturais devido a pouca ação antrópica, relacionada ao baixo número de habitantes e baixo desenvolvimento socioeconômico da região. Constituindo-se em um sistema deposicional próximo ao estado de desenvolvimento natural, ideal para estudos de geologia marinha. Apesar de diferentes pesquisas terem sido desenvolvidas na porção terrestre (e.g. ARIAS *et al.*, 2016, ZULAR *et al.*, 2020, FERREIRA *et al.*, 2021) ou nos canais de maré (e.g. AQUINO DA SILVA *et al.*, 2015, GOIS SMITH *et al.*, 2021) do DRP, muito pouco se conhece acerca da plataforma adjacente ao DRP (e.g. AQUINO DA SILVA *et al.*, 2016; DIAS *et al.*, 2021). Esse estudo pretende minimizar esta lacuna através da ampliação do conhecimento sobre essa plataforma da margem equatorial brasileira (Figura 1a).

A plataforma continental é o prolongamento da área continental emersa que apresenta profundidade média de até 200 metros (m) e é de extrema importância para a geomorfologia, pois por ser uma área rasa, permite a entrada do sol

até seus 200 m de profundidade, fazendo assim com que ocorra a fotossíntese. Sua extensão varia de acordo com a localidade, no caso do Brasil, ela será mais curta e rasa na região nordeste e mais longa e profunda na região norte do país (e.g. VITAL *et al.*, 2005, 2010, 2023).

No continente é comum a formação de rios que se estendem até a plataforma continental, um exemplo é o rio Parnaíba (RP), que tem seu curso totalmente inserido na região nordeste do Brasil. Tem aproximadamente 1450 m de extensão desde a sua nascente até a sua foz no oceano atlântico, onde ele forma um grande delta em mar aberto.

Por influência de fatores como ondas, maré, correntezas e presença de rios que desembocam no oceano é comum que a plataforma continental marinha apresente uma grande geodiversidade de relevos submersos, bem como cobertura sedimentar associada (Figura 1b); Os relevos mais comuns são bancos de areia, dunas, platôs, afloramentos rochosos e vales.

As dunas constituem elevações de relevo em forma de morros isolados, mostrando taludes mais suaves a barlavento e taludes mais íngremes a sotavento (e.g. GALLOTTI, 2008; GROTZINGER, 2013; BAPTISTA NETO *et al.*, 2004). Já os platôs são elevações no relevo que possuem extensão um pouco mais ampla e a parte mais alta relativamente plana, em geral apresentam altitudes medianas, sendo menores que as montanhas e maiores que as planícies (GALLOTTI, 2008; ARAUJO, 2018).

Os afloramentos rochosos são, a exposição de uma rocha na superfície da Terra, ou no substrato marinho. Já os vales são feições negativas, uma depressão entre duas montanhas ou relevos positivos (BAPTISTA NETO *et al.*, 2004; GALLOTTI, 2008).

É possível observar a partir dos mapas gerados neste estudo (batimetria, declividade e direção de declividade) utilizando-se do método de interpolação krigagem (LANDIM, 2000; CHIAO *et al.*, 2014), uma técnica de gridagem geoestatística para dados aleatórios (GEOSOFT, 2022) a presença de todas essas feições na plataforma Equatorial nordeste, mais especificamente na região em frente ao delta do rio Parnaíba.

2. Geologia local

A bacia de drenagem do rio Parnaíba ocupa uma área total de 331.441 Km², sendo 249.497 Km² no Piauí, 65.492 Km² no Maranhão, 13.690 Km² no Ceará e 2.762 Km² de área em litígio entre Piauí e Ceará (Ministério do Meio Ambiente, 2006) e é composta principalmente por rochas sedimentares do período Paleozoico (GÓES & FEIJÓ, 1994).

A Região do rio Parnaíba encontra-se fixada em duas grandes unidades estruturais: o escudo cristalino (15% da área) e a Bacia sedimentar do Parnaíba (85% da área). Caracteriza-se, principalmente, por sedimentos de cobertura Cenozóico (areias e argilas), rochas sedimentares do Mesozóico e Paleozóico (arenitos e argilitos) e Rochas Pré-Cambrianas (gnaises, granitos e migmatitos) (Figura 1b).

Segundo Aquino da Silva (2015) a bacia do Parnaíba tem seu arcabouço tectônico formado por falhas lítricas normais com direção WNW-ESE e NWSE, que definem um sistema distensivo que é cortado por falhas mais novas de direção NE-SW.

Fonte: a: modificado de VITAL *et al.* 2010; b: Projeto PIATAM 2008; c: GÓES *et al.* (1993), modificado por ALMEIDA (2000).

A bacia de Barreirinhas tem aproximadamente 40.000 km², se desenvolveu sobre a bacia do Parnaíba e ocupa a porção costeira da plataforma continental do estado do Maranhão. Seu embasamento é composto pela coluna estratigráfica da bacia do Parnaíba e é separada da bacia do Parnaíba pelos arcos tectônicos de Ferrer-Rosário-Bacaba e o arco Urbano Santos (Figura 1c). Estes arcos interferiram fortemente na evolução das bacias da margem continental e possibilitaram a erosão do pacote sedimentar superior da Bacia do Parnaíba (CPRM, 2000).

3. Materiais e métodos

Dados batimétricos

O banco de dados utilizado neste trabalho é composto de dados hidroacústicos, mais especificamente dados batimétricos do tipo monofeixe, fornecidos pelo BNDO no formato ASCII, e foram coletados pelo centro de hidrografia da Marinha (CHM) na fase I do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC) e digitalizados pelo Laboratório de Topografia e Geodesia (LTG) presente na Universidade de São Paulo (USP).

Os dados utilizados neste trabalho compreendem as folhas de bordo números Fb500-001_75 (contendo 9.425 pontos), Fb500-001_76 (contendo 8.819 pontos) e Fb600-001_74 (contendo 6.873 pontos) do relatório gerado pelo LTG, no total foram 25.117 pontos digitalizados. A digitalização da posição de cada um dos pontos foi realizada pelo LTG e respeitou as normas para lançamento da profundidade estabelecida pela Marinha do Brasil (Figura 2).

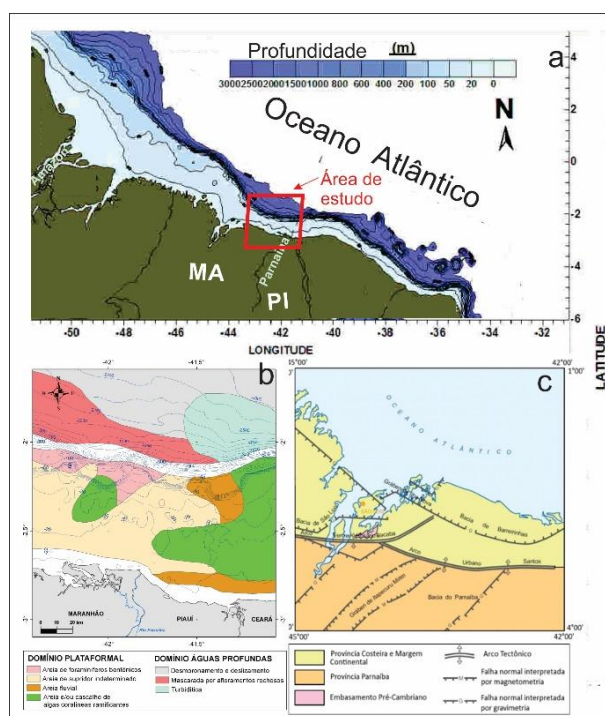


Figura 1: Área de estudo. a) Localização na margem equatorial brasileira; b) Cobertura sedimentar; c) Arcabouço estrutural da bacia do Barreirinhas e da bacia do Parnaíba

A)	0 ₁	1 ₂	2 ₄	3 ₆	4 ₇	5 ₈	6 ₃	7 ₁	8 ₂	9 ₄	9 ₅
B)	10 ₁	12 ₆	20 ₇	21 ₄	34 ₆	56	97				
C)	100	205	334	1025	3960						
D)	234	567	2345	1324	(GEBCO)						

Figura 2: Norma para lançamento das profundidades

Fonte: Centro de hidrografia da Marinha

Os pontos de sondagem utilizados se encontram entre as isóbatas de -10 a -100 m de profundidade (Figura 3) foram aquisitados com distância lateral variando de 0.8 a 1 km, entre linhas a distância varia de 1.5 a 1.8 km, porém uma parte dos pontos não segue estes valores podendo variar para mais ou para menos, por este motivo foi escolhido realizar a interpolação dos dados utilizando o método da krigagem.

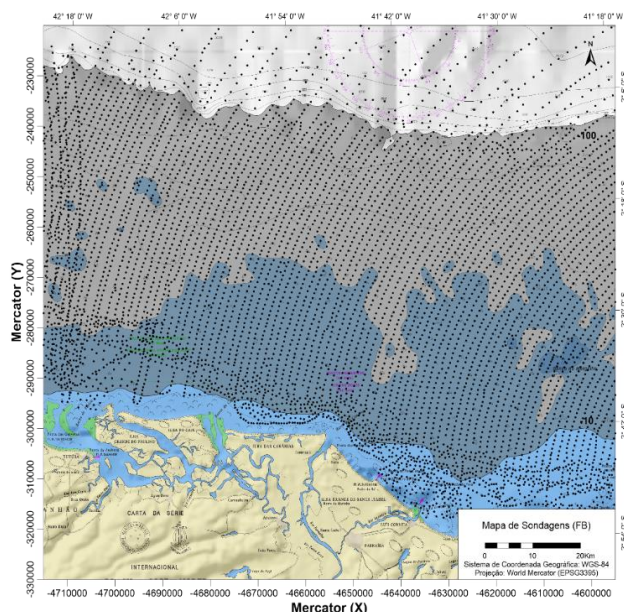


Figura 3: Pontos de sondagem da área de estudos
Fonte: Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil.

Os dados foram digitalizados na escala de 1:150 000, para o qual foi adotado a projeção de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), onde os valores obtidos neste sistema são medidas de distâncias, o que o torna muito mais simples e permite identificar qualquer ponto da superfície com precisão de 1 metro. Nesse sistema o eixo y está associado ao eixo N e o eixo

x está associado ao eixo E, dessa forma as coordenadas do eixo N aumentam de baixo para cima e as do eixo E aumentam da esquerda para a direita (MACHADO Jr. *et al.*, 2004).

Mapas

Foram produzidos mapas utilizando os métodos de Krigagem e o de mínima curvatura no *software* Surfer 13 (Figura 4), ambos os métodos apresentaram mapas similares em feições, porém o método da mínima curvatura criou artefatos inexistentes ao dado e o deixou bastante ruidoso, ao contrário do método da krigagem que não apresentou tantos ruídos e se mostrou mais parecido com o que se era esperado para a área.

Os resultados apresentados em cada mapa irão depender da escala utilizada para sua geração, a escala escolhida irá identificar diferentes características geomorfológicas na área, que podem vir a variar de finas a amplas. Para se obter as melhores classificações de zonas e estruturas, foram geradas várias grades de grande e pequena escala para o local de estudos, foram utilizados os fatores de escala de 50, 100 e 1000 para suas criações.

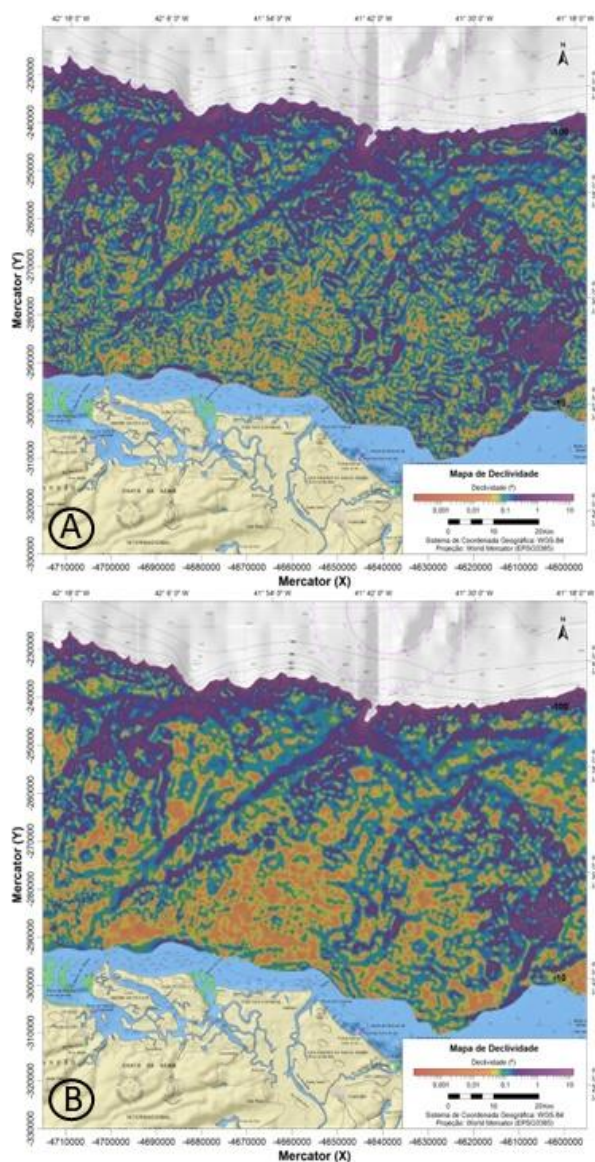


Figura 4: A) Imagem mostrando o método da mínima curvatura aplicado e B) Imagem mostrando o método da krigagem aplicado ao mapa de declividade.

Fonte: Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil.

Dados geomorfológicos

A classificação da geomorfologia foi baseada na análise conjunta entre os mapas gerados de batimetria, de declividade e da direção da declividade (*aspecto*). Para a classificação geomorfológica do fundo marinho, o mapa de declividade foi utilizado para distinguir os limites entre planícies (até 1 grau de declividade), elevações e declives suaves (de 1 a 5 graus de declividade) e elevações e declives íngremes (maiores que 5 graus de declividade) (GOES, 2018). O mapa de aspecto foi utilizado

para distinguir as feições menores que tendem a passar despercebidas nos demais mapas.

Além dos mapas de batimetria, declividade e aspecto, foi utilizado um mapa sedimentológico da área para auxiliar na classificação geomorfológica do local e para isso foi construído um mapa de amostras superficiais da área de estudo. Os dados sedimentológicos foram coletados utilizando uma van veen e foram disponibilizados pelo centro de hidrografia da Marinha do Brasil (CHM) através do banco nacional de dados oceanográficos (BNDO). Desta forma, foram repassados um total de 20 pontos de amostragem (Tabela 1) para a área da plataforma continental em frente ao delta do rio Parnaíba.

Composição do fundo		
LAT	LONG	Sedimentos
-23400	-414200	Cascalho com biodetritos
-23300	-455100	Areia grossa com cascalho - com biodetritos
-23818	-414818	Areia grossa
-24000	-414200	Areia grossa com cascalho - com algas biodetrítica e quartzosa
-24521	-414121	Areia grossa - com conchas
-23300	-422300	Areia média
-24624	-414018	
-23452	-414319	
-23706	-415748	
-23742	-415748	Areia média - com conchas
-24030	-414224	
-23400	-424000	Areia média - quartzosa
-23348	-422712	Areia fina
-24024	-414631	
-23957	-414433	
-23324	-420518	Areia fina - biodetrítica
-23704	-421215	
-24000	-420200	Areia fina com lama (silte) quartzosa
-23900	-422000	
-23312	-415942	Areia fina - terrígena

Tabela 1: Composição do fundo marinho

4. Resultados

Análise dos dados

Para escolha do método de interpolação a ser utilizado, foram realizados testes com ambos os

métodos (mínima curvatura e krigagem) com diferentes valores de escala, a escala de 1000 levou aproximadamente 30 minutos para ser gerada pelo *software*, ao ser analisada percebeu-se que ela gerou artefatos inexistentes ao dado e sua célula ficou destorcida, logo foi descartada; a escala de 50 foi gerada em aproximadamente 14 horas e se mostrou similar à escala de 100, porém devido ao tempo que esta levou para ser gerada pelo *software* e por ela se mostrar similar à de 100, ela foi descartada; já a escala de 100 levou

cerca de 4 horas para ser gerada e nela foi possível identificar as feições da paisagem marinha presentes no local, por este fator, essa foi a escala escolhida para ser utilizada neste estudo junto ao método de interpolação krigagem.

O mapa batimétrico apresentado na figura 6(1a), mostra feições com profundidades que variam de -10 a -100 metros em direção a quebra da plataforma; utilizando-se dos mapas de batimetria (Figura 6 (1a)), declividade (Figura 6 (2a)) e direção de declividade (Figura 6 (3a)) foi possível observar a grande heterogeneidade que compõe a região. A declividade média que a região apresenta está em torno de $0,06^\circ$ ou 1:1000. Feições de destaque são ressaltadas nas figuras por letras (a, b, c, d).

O método de interpolação escolhido para confecção dos mapas foi o método da krigagem, ao invés do método de mínima curvatura. Ambos os métodos apresentaram mapas similares em feições, porém o método da mínima curvatura como já se era esperado, criou artefatos inexistentes ao dado e o deixou bastante ruidoso, ao contrário do método da krigagem que não apresentou tantos ruídos e se mostrou mais parecido com o que se era esperado para a área.

Foi possível observar entre as isóbatas de -10 m e -19 m de profundidade a presença de alguns lineamentos com direção SE – NO (b), que foram mais bem evidenciados no mapa de direção da declividade (Figura 6(2a)), além da presença de pequenas manchas de relevos positivos (c) e uma área com a presença de relevo negativo (d), além de manchas que representam relevo positivo (a) na região. Após a isóbata de -30 m observa-se a profundidade decaindo até a quebra da plataforma.

No mapa de direção de declividade (Figura 16) o lineamento SE – NO encontra-se bem demarcado (b); além desse lineamento, também foi possível observar a presença de outros lineamentos na mesma direção. Entretanto, estes não aparecem nos mapas de batimetria e declividade da superfície. Lineamentos com direção preferencial de SO – NE também foram identificados.

No mapa de direção da declividade (Figura 6(3)) é possível observar o lineamento SE – NO bem demarcado (d), além desse lineamento,

também é possível observar a presença de outros lineamentos na mesma direção, esses lineamentos não aparecem nos demais mapas (batimetria e declividade). Além dos lineamentos com direção SE – NO, também foi possível observar vários lineamentos com direção preferencial de SO – NE. As feições a, b e c que aparecem nos mapas de batimetria e declividade não são vistas nesse mapa.

Composição sedimentológica

O mapa de composição do fundo marinho (Figura 5) mostra que das 20 amostras coletadas pelo CHM, catorze delas estão localizadas entre as isóbatas de -10 a -19 m, duas nas isóbatas de -20 a -29 m e quatro fora da área de pesquisa e nenhuma das coletas foi realizada além da isóbata de -29 m. As amostras tendem a estarem mais localizadas na região leste e sul da plataforma, deixando as demais áreas com um déficit de amostras.

No mapa de composição sedimentológica do fundo marinho (Figura 5) é possível observar a presença de areias variando de fina, a grossa, cada uma com suas particularidades, podendo ter a presença de cascalho, conchas, materiais biodetríticos, do tipo terrígeno, lama, com algas e com a presença de quartzo, além da presença de areia também é possível observar a presença de cascalho com biodetritos.

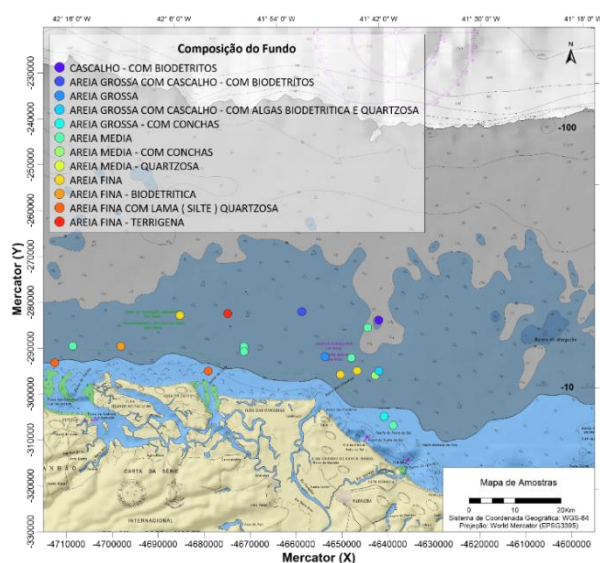


Figura 5: Mapa de distribuição das amostras e suas granulometrias.

Fonte: Modificado da carta náutica 21700 Marinha do Brasil.

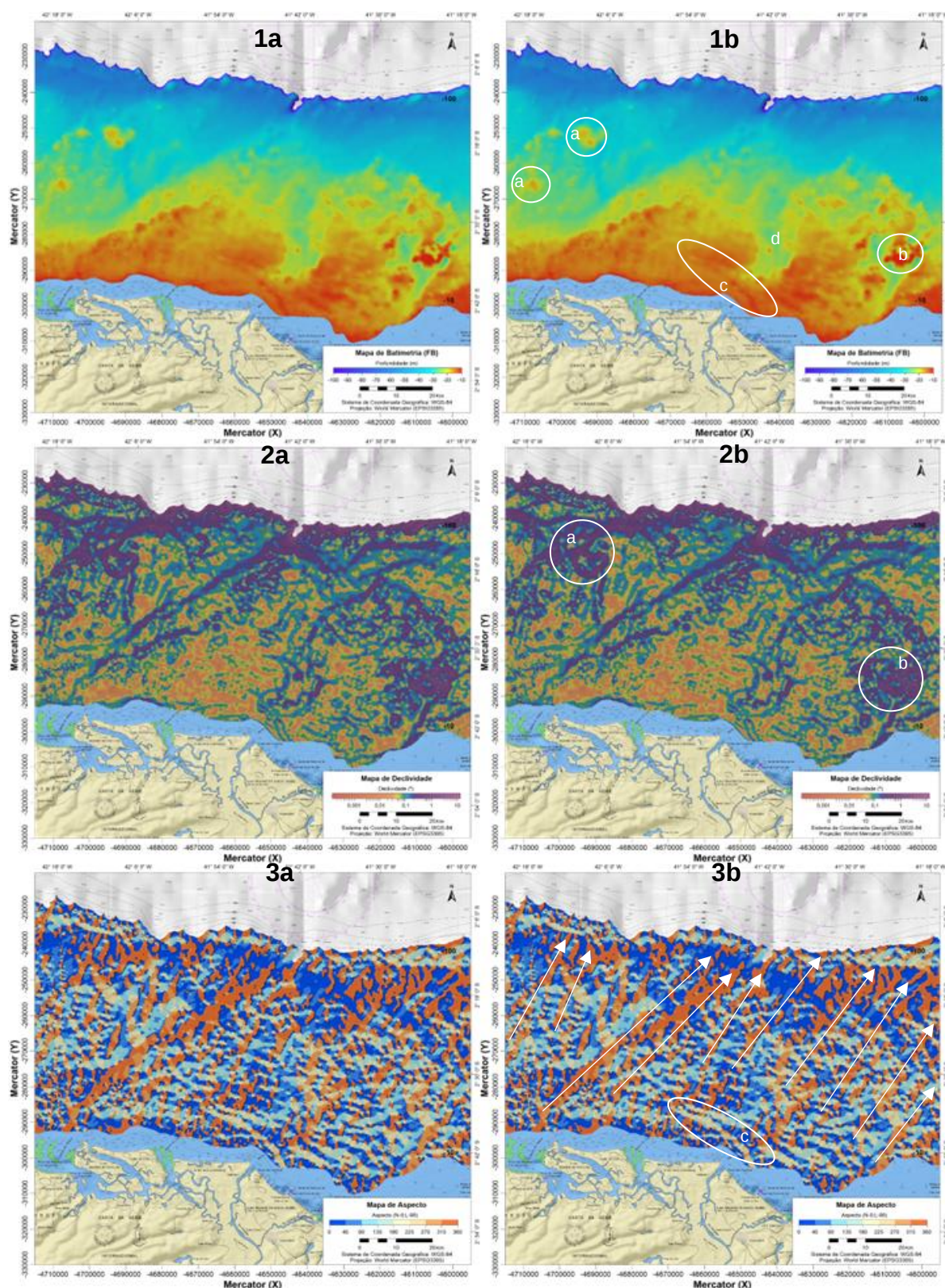


Figura 6: Mapa de batimetria (1) mostrando a presença de altos relevos (a,b) e um baixo relevo (c). Mapa de declividade da superfície (*slope*)(2) indicando a presença de feições com alto declive (a,c) e setas indicando a presença de regiões com lineamento SO-NE. Mapa de direção da declividade (3) com setas indicando a direção preferencial do declive dos lineamentos (SO-NE). Tutoia

Fonte: Modificado da carta náutica 21700, Marinha do Brasil.

Perfis batimétricos

Para melhor análise do modelo batimétrico, foram traçados 10 perfis (Figura 7) ao longo da

área, a partir destes perfis foi possível visualizar como a área se comporta em termos de relevo e feições presentes no local.

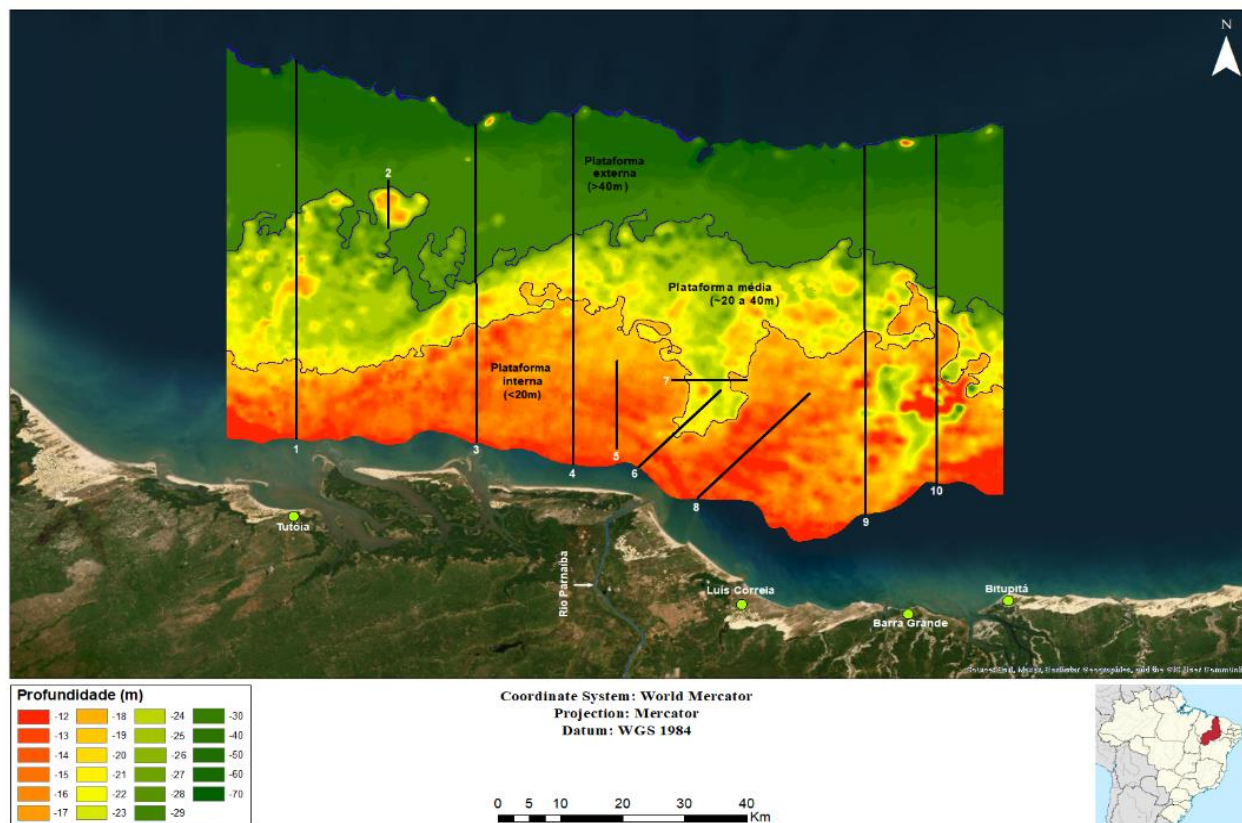


Figura 7: Mapa de perfis batimétricos (1 a 10)

No perfil 1 (Figura 8) é possível observar a divisão da plataforma continental em três partes (interna, média e externa), onde apresentam comprimentos da ordem de 14 km, 25 km e 26 km respectivamente. Na plataforma interna pode-se observar a presença de uma planície, seguida de um declive suave, esse declive se encontra na zona de transição da plataforma interna para a plataforma média, em seguida é possível observarmos uma planície seguida de um alto relevo que apresenta cerca de 5 m de comprimento e aproximadamente 8 m de altura, após o alto relevo é possível observarmos dois declives íngremes, seguidos por uma planície e outro declive íngreme que marca a passagem da plataforma média para a plataforma externa, onde é podemos visualizar a presença de um declive íngreme, um alto relevo, um baixo relevo e pôr fim a quebra da plataforma.

O perfil 2 (Figura 9) encontra-se inserido na plataforma média, esse perfil tem aproximadamente 9000 m de comprimento e apresenta uma feição com altura de

aproximadamente 13 m e 8000 m de comprimento.

O perfil 3 (Figura 8) tem aproximadamente 55 km de comprimento e compreende as plataformas interna, média e externa. A plataforma interna nesse perfil apresenta aproximadamente 21 km e é marcada por uma planície; no seu final encontra-se a plataforma média com aproximadamente 7.4 km marcada por um declive suave, seguida da plataforma externa com 27 km, marcada por uma planície e ao final do perfil a quebra da plataforma.

O perfil 4 (Figura 9) tem aproximadamente 60 km de extensão, onde 27.6 km pertencem a plataforma interna, 11.7 km a plataforma média e 20.7 km a plataforma externa. A plataforma interna é representada por uma planície com altos e baixos relevos e um declive suave que se segue até o final da plataforma média, onde se tem a presença de três declives íngremes marcando o início e o fim da plataforma externa, onde se encontra a quebra da plataforma.

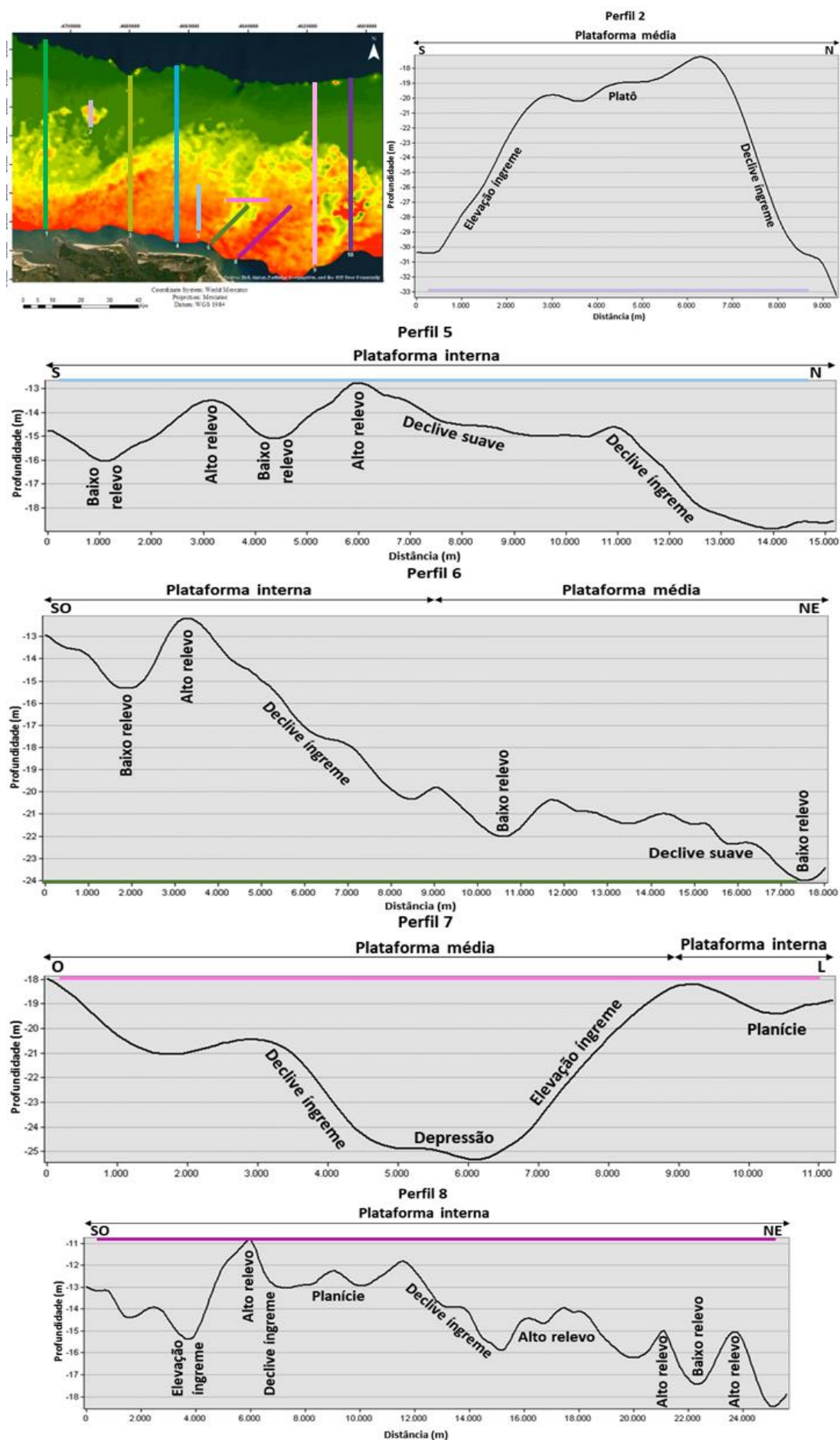


Figura 9: Perfis batimétricos 2, 5, 6, 7 e 8 em trechos selecionados.

O perfil 5 (Figura 9) tem aproximadamente 15 km de extensão, encontra-se totalmente inserido na plataforma interna e foi traçado nos lineamentos SE – NO. Ele apresenta vários altos e baixos relevos com alturas que variam de 2.5 m a 3 m de altura, seguidos por um declive suave e um declive íngreme que marca a passagem da plataforma interna para a plataforma média.

O perfil 6 (Figura 9) tem aproximadamente 18 km e está dividido entre as plataformas interna e média, onde os 9 km iniciais representam a plataforma interna e os outros 9 km a plataforma média. A plataforma interna apresenta baixos e altos relevos que medem 2.5 m de profundidade e 2.5 m de altura respectivamente; em seguida têm-se início um declive íngreme que marca a passagem da plataforma interna para a plataforma média com uma diferença de 10 m de profundidade. A plataforma média apresenta baixos relevos e um declive suave.

O perfil 7 (Figura 9) tem aproximadamente 11 km e está inserido entre as plataformas interna e média. Nesse perfil a plataforma interna mede aproximadamente 2 km e é marcada pela presença de uma planície, já a plataforma média mede 9 km e apresenta a presença de um declive íngreme, seguido de uma depressão e uma elevação íngreme, a depressão aqui apresentada tem aproximadamente 7 m de profundidade.

O perfil 8 (Figura 9) está totalmente inserido na plataforma interna e tem aproximadamente 25 km de extensão. Esse perfil é marcado por vários altos e baixos relevos que variam de 4 a 2 m de altura e profundidade, além da presença de uma planície, declives e elevações íngremes.

O perfil 9 (Figura 8) tem aproximadamente 65 km de extensão apresenta plataforma interna, média e externa. A plataforma interna tem aproximadamente 31 km e é possível observar a presença de planícies, altos e baixos relevos, uma elevação e um declive íngreme. A plataforma média mede aproximadamente 14 km e é marcada por um declive suave; ao final da plataforma média encontra-se um declive íngreme que dá início a plataforma externa, que mede 18 km de extensão e é marcada por declives íngremes e baixos relevos, o final do perfil é marcado por um alto seguido da quebra abrupta da plataforma.

O perfil 10 (Figura 8) tem aproximadamente 60 km de extensão e é subdividido entre plataforma interna, média e externa. A

plataforma interna apresenta 29 km de extensão e é marcada pela presença de uma planície, altos e baixos relevos com alturas variando de 10 m a 15 m de altura e profundidade, além de elevações e declives íngremes e um declive suave. O início da plataforma média é representado por um declive suave que logo se torna íngreme, essa porção da plataforma tem extensão média de 4 km, sendo seguida pela plataforma externa com 26 km de extensão, representada por declives íngremes e suaves, e como o perfil 9 com um alto relevo na borda da plataforma; logo após têm-se a quebra da plataforma continental.

5. Discussões

É possível observarmos no mapa de batimetria e de declividade a grande ocorrência de lineamentos com direção preferencial SO – NE presentes na área, esses lineamentos podem estar relacionados a antigos vales e paleovales na região, que estão relacionados a antigos percursos que o rio Parnaíba adotou no passado (AQUINO DA SILVA *et al.*, 2016).

Conforme o rio Parnaíba foi migrando para sua atual posição, ele foi escavando esses vales e entre eles formou-se altos relevos (Figuras 8 e 9), no mapa da figura 5 pode-se observar que a composição desses altos relevos com direção SO – NE é principalmente areia fina a média, biodetrítica, com conchas e quartzo, o que mostra que possivelmente essa área representa um campo de dunas arenosas. Na parte mais a oeste a composição é de areia fina com lama, areia biodetríticas e areia terrígena, que poderiam estar relacionadas a passagem de um antigo rio cuja planície costeira foi afogada pelo atual nível do mar (MARTINS e NUNES, 2007), indício da presença de antigos percursos do RP.

A plataforma interna observada nos dez perfis gerados, apresentam média de 22 km de extensão e profundidade média de 12 m. A passagem da plataforma interna para média na porção nordeste do Piauí ocorre em torno de 20 m como previsto na literatura (VITAL *et al.*, 2005, 2023; FREIRE *et al.*, 2009).

Os perfis traçados na plataforma média, apresentam extensão média em torno de 12 km e profundidade média de 21 m; a passagem para a plataforma externa se dá entre 35 e 40 m de profundidade, também em concordância com a literatura (VITAL *et al.*, 2005, 2010; FREIRE *et*

al., 2009), esse valor tende a ser menor mais a leste, quando se aproxima do estado do Ceará, onde Freire *et al.* (2009) compartimenta a plataforma em apenas interna e externa.

A extensão média encontrada para a plataforma externa foi de 29 km e profundidade entre 35-40 m a 50-60 m. Um pouco mais rasa que o previsto por Vital *et al.*, (2005) e Freire *et al.*, (2009).

Os valores de extensão para as plataformas foram diferentes do esperado, isso se deve ao fato de que as medidas realizadas pelo programa de avaliação do potencial sustentável de recursos vivos na zona econômica exclusiva (Revizee) vão desde a linha de costa até a quebra da plataforma e os dados utilizados nesta pesquisa começam a partir da isóbata de 10 m que fica acerca de 7 m da linha de costa, além do fato das médias desta pesquisa serem calculadas a partir dos 10 perfis traçados, deixando assim uma grande área sem medidas.

A plataforma interna apresenta uma variedade de feições geomorfológicas e concentra a maior parte das amostras sedimentológicas presentes na área, sua composição é basicamente areia quartzosa e lama (VITAL *et al.*, 2005; FREIRE *et al.*, 2009 e GOES, 2018). Essa parte da plataforma apresenta um relevo suave que mostra algumas irregularidades (altos e baixos relevos) atribuídas a presença de canais, bancos de areias, campos de dunas e possíveis recifes presentes nessa região, essas feições se assemelham as descritas por Vital *et al.* (2005), Freire *et al.*, (2009), Goes (2018) e Lisniowski (2020).

A plataforma média apresenta um relevo mais íngreme e com a presença de declives que marcam a passagem da plataforma interna, para a plataforma média. Segundo Vital *et al.* (2005), a plataforma média é recoberta por sedimentos grossos de origem biogênica. Nessa região é possível observar a presença de feições semelhantes a platôs (Perfil 2, Figura 11), que são descritos por Araújo (2018) como elevações de relevo com uma extensão ampla e a parte mais alta relativamente plana. Entretanto, estudo de maior detalhe realizado por DIAS *et al.* (2021), com imagens de satélite de alta resolução e vídeos com *drop-camera*, mostraram que nesse caso específico trata-se de grande concentração de pináculos recifais rasos, constituídos por colônias esparsas de corais fixos sobre estruturas

rígidas formadas (cobertas) por incrustações de algas calcárias sobrepostas.

Também foi possível visualizar uma depressão que foi associada a um paleocanal do Parnaíba. De acordo com França (1976) e Summerhayes *et al.* (1976), a drenagem continental em períodos de níveis do mar mais baixos que o atual, estariam diretamente relacionadas aos relevos negativos.

A plataforma externa com relevo íngreme e irregular, é descrita por Vital *et al.*, (2005) e Freire *et al.*, (2009) como composta por areias e lamas biodetríticas e cascalhos de algas. As irregularidades presentes aqui estão relacionadas ao aumento de profundidade em direção a quebra da plataforma, além dos bancos de areia presentes no local. A presença frequente de zonas elevadas na borda da plataforma, possivelmente estaria relacionada a um menor afluxo de sedimentos terrígenos, permitindo a proliferação de organismos que compõe a fábrica de carbonatos, como demonstrado em outras áreas da margem brasileira (e.g. GOMES *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2020; VITAL *et al.*, 2023). A exposição subaérea desses sedimentos carbonáticos seria responsável pela geração de um relevo cárstico nessas áreas da plataforma.

Conclusão

A partir da construção e análise do mapa batimétrico utilizando-se o método de interpolação krigagem e da análise de seus derivados, mapa de declividade e do mapa da direção da declividade, foi possível a visualização das formas de relevo de grande porte presentes na plataforma nordeste em frente ao delta do rio Parnaíba (PI/MA). Para melhor interpretação dos mapas, a plataforma foi dividida em: plataforma interna, plataforma média e plataforma externa. A plataforma interna apresentou extensão média de 22 km, a plataforma intermediária extensão média de 12 km e a plataforma externa média de 29 km. A quebra da plataforma foi observada entre 50-60 m de profundidade.

Para melhor se interpretar as formas de relevo vistas em mapa, foram construídos dez perfis batimétricos, dos quais os perfis 1, 3, 4, 9 e 10 cobrem as três subdivisões (interna, média e externa) da plataforma, os perfis 5 e 8 cobrem apenas a plataforma interna, os perfis 2 e 7

cobrem a plataforma média e o perfil 6 cobre as plataformas interna e média.

A partir dos perfis traçados foi possível a identificação das feições presentes na área. Na plataforma interna foi identificada a presença de planícies, dunas, bancos de areia, possíveis recifes e canais; já para a plataforma média foi encontrado a presença de declives íngremes, altos e baixos relevos, recifes associados a afloramentos rochosos e vales. Essa porção da plataforma é recoberta por sedimentos grossos de origem biogênica. Na plataforma externa foi observado a presença de relevo íngreme e cheios de irregularidades, apresentando altos e baixos relevos, com um substrato composto por areias e lamas biotriticas e cascalhos de algas.

A variedade de feições submersas presentes (e.g. canais, vales, bancos de areia, duna, recifes) na área, indicam uma intensa modificação na direção e hidrodinâmica local. A integração do mapa batimétricos com seus derivados, declividade e aspecto, permitiram uma melhor visualização dessas feições geomorfológicas.

Os resultados mostram ainda a ausência de dados científicos para essa porção da margem continental brasileira, cuja ampliação é necessária para a cartografia e caracterização adequada do fundo do mar, de forma a permitir a gestão adequada e a exploração sustentável dos recursos minerais e energéticos.

Agradecimentos

A CAPES pela concessão de bolsa de mestrado a primeira autora (Código de Financiamento 001), ao BNDO pela disponibilização dos dados utilizados nessa pesquisa, a UFRN, através do laboratório GGEMMA pela disponibilização da estrutura e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. A pesquisa foi subsidiada pela CAPES e CNPq através dos projetos PQ CNPq 315742/2020-8, CAPES CSF-PVE 88881.068034/2014-01, CAPES-IODP 88887.123925/2015-00 e 465634/2014-1.

Referências

- AQUINO DA SILVA, A.G. 2015. The Parnaíba River Delta – from modern hydro and morphodynamics to sea level change.
- AQUINO DA SILVA, A.G. STATTEGGER, K., SCHWARZER, K., VITAL, H. 2015. The influence of climatic variations on River delta hydrodynamics and morphodynamics in the Parnaíba delta. *J. Coast. Res.* 31 (4), 930e940.
- AQUINO DA SILVA, A.G. STATTEGGER, K., SCHWARZER, K., VITAL, H. 2016. Seismic stratigraphy as indicator of late Pleistocene and Holocene sea level changes on the NE Brazilian continental shelf. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 188-197p.
- ARAUJO, I.R.F. 2018. Platô do Ceará: Uma Plataforma Carbonática Isolada e Afogada da Margem Equatorial Brasileira. Dissertação de Mestrado em Geodinâmica e Geofísica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 116p.
- BAPTISTA NETO, J.A., PONZI, V. R. A., SICHEL, S. E. 2004. Introdução à Geologia Marinha. Interciência, Brasil, Rio de Janeiro, 284p.
- CHIAO, L.Y, CHEN, Y, N, GUNG, Y. 2014. Constructing empirical resolution diagnostics for kriging and minimum curvature gridding. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*. Taiwan, p. 3939-3954. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2013JB010364>. Acesso em: 13 jan. 2023.
- CPRM. 2000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Luís SW/NW, Folhas SA.23-V e SA.23-Y. Estados do Pará e Maranhão. Escala 1:500.000./ organizado por Herbert Georges de Almeida. – Brasília: CPRM, 2000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br>.
- DIAS G.T.M., SILVA R.C.O., SANTOS FILHO J.R. 2021. Manoel Luiz Reefs morphology unveiled by high resolution satellite images (North Brazilian Continental Shelf). *Quaternary and Environmental Geosciences*. 46-59p.
- FENTY, I., WILLIS, J. K., KHAZENDAR, A., DINARDO, S., FORSBERG, R.,

- FUKUMORI, I., HOLLAND, D., JAKOBSSON, M., MOLLER, D., MORISON, J., MÜNCHOW, A., RIGNOT, E., SCHODLOK, M., THOMPSON, A. F., TINTO, K., RUTHERFORD, M., & TRENHOLM, N. (2016). Oceans Melting Greenland: Early Results from NASA's Ocean-Ice Mission in Greenland. *Oceanography*, 29(4), 72–83p.
- FERREIRA, T.A.B., AQUINO DA SILVA, A.G., PEREZ, Y.A.R., STATTEGGER, K., VITAL, H. 2021. Evaluation of decadal shoreline changes along the Parnaíba Delta (NE Brazil) using satellite images and statistical methods, *Ocean & Coastal Management*, V: 202, 105513p.
- FERREIRA LC, BASTOS AC, AMADO FILHO GM *et al.* 2020. Chapter 30 - Submerged reefs in the Abrolhos Shelf: morphology and habitat distribution In: Peter Harris Elaine Baker. (Org.). *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat*. 2ª ed. Berlin: Elsevier, 519-532p.
- FRANÇA, A.M.C. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 6: 71–88p.
- FREIRE, G. S. S., MANSO, V.A.V., SILVA FILHO, W. F., GOMES, O. F., LIMA, S. F., SERGIO BEZERRA, R. P., ARAÚJO, T. C. M., OLIVEIRA, P. P. R. 2009. Programa REVIZEE - Score Nordeste: oceanografia geológica - Sedimentologia e morfologia da margem continental do nordeste do Brasil. Fortaleza: Martins & Cordeiro, 248 p. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/pt-br/psrm/revizee>. Acesso em: 12 dez. 2022.
- GALLOTTI, T. F. 2008. *Geomorfologia - Conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, 322p.
- GEOOFT. Oasis Montaj - Manual do Curso: gridagem com o método de krigagem. Disponível em: <https://www.seequent.com/>. Acesso em: 02 dez. 2022.
- GÓES, A.M., FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 8: 57–67.
- GOES, E. R. 2018. Mapeamento preditivo dos habitats marinhos na plataforma continental interna adjacente aos municípios de Paulista e Olinda (PE). Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 73p.
- GOMES, M.P.; VITAL, H.; SILVA, L.L.N.; EICHLER, P.P.B.; ROVIRA, D., LONGO, G. O. 2020. Nature and condition of outer shelf habitats on the drowned Açu Reef, NE Brazil. In: Peter Harris; Elaine Baker. (Org.). *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat*. 2aed.Berlin: Elsevier, v. 1, 571-585p.
- GOMES, M.P., VITAL, H. 2010. Revisão da compartimentação geomorfológica da Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 3, n. 40, 321-329p.
- GOIS SMITH, F.S., VITAL, H., AQUINO DA SILVA, A.G., STATTEGGER, K., PEREZ, Y.A.R. 2021. Late Holocene evolution of the Parnaíba River Delta (Brazilian Equatorial Margin): Evidence of lobe switching process from mineralogical analysis and age dating on sediment cores, *Journal of South American Earth Sciences*, V: 112, 103530p.
- GROTZINGER, J. Transporte fluvial: das montanhas aos oceanos. In: GROTZINGER, J; JORDAN, T. PARA ENTENDER A TERRA. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Cap. 18. 1-881p.
- HAMBLIN, W. K.; CHRISTIANSEN, E.H. 2012. *Earth's Dynamic Systems*. 10. ed.: Pearson, 2012. 816 f. 10 v.
- JAKOBSSON, M., MAYER, LA, E ARMSTRONG, A., 2003, Análise de dados relevantes para estabelecer limites externos de uma plataforma continental sob Lei do Mar Artigo 76, *International Hydrographic Review*, v: 4. 2-18p.

- LANDIM, P.M.B. 2000. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 20p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textod i.html>>. Acesso dia: 05 de janeiro de 2023.
- LISNIEWSKI, M. A. 2020. Caracterização de potenciais habitats bentônicos na elevação do rio grande. Tese de Doutorado - Curso de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 127p.
- MAYER L., JAKOBSSON M., ALLEN G., DORSCHER B., FALCONER R., FERRINI V., LAMARCHE G., SNAITH H., WEATHERALL P. 2018. The Nippon Foundation—GEBCO Seabed 2030 Project: The quest to see the world's oceans completely mapped by 2030. *Geosciences*, 8, 63.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2006. Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba. Brasília: MMA.
- REGALI, M.S.P., UESUGUI, N., LIMA, E.E.C. 1985. Palinoestratigrafia e paleoambiente da Bacia de Barreirinhas Maranhão-Brasil. Rio de Janeiro: DNPM, Coletânea de trabalhos paleontológicos, 461-470p.
- SOUZA, J. M. 1999. Mar territorial, zona econômica exclusiva ou plataforma continental? *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, 17: 79-82.
- SUMMERHAYES, C.P., FAINSTEIN, R. & ELLIS, J.P. 1976. Continental margin off Sergipe and Alagoas, Northeast Brazil: a reconnaissance geophysical study of morphology and structure. *Marine Geology*, 20: 345–361.
- TESSLER, M. G., MAHIQUES, M.M. 2000. Processos oceânicos e a fisiografia dos fundos marinhos. IN: TEIXEIRA, W. et al. *Decifrando a Terra*. São Paulo, Oficina de Textos, 261-284p.
- VAZ, P. T. et al. 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.253-263.
- VITAL, H., ESTEVES, L., ARAÚJO, T. C. M., PATCHINEELAM, S. M. 2005. Oceanografia geológica e geofísica da plataforma continental brasileira. In: SOUZA, C.R.G. et al., *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, Cap. 8. p. 153-175.
- VITAL H., GOMES M.P., TABOSA W. F., FRAZAO E.P., PLÁCIDO JUNIOR J.S., SANTOS C.L.A. 2010. Characterization of the Brazilian continental shelf adjacent to Rio Grande do Norte state, NE Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, p. 43-54.
- VITAL H., DOMINGUEZ J.M.L., BASTOS A.C., ARAUJO T.C.M. (aceito). Geodiversity and Biodiversity of the Tropical Shelf of Northeastern Brazil. In: DOMINGUEZ J.M.L., KIKUCHI R.K.P., ARAUJO M., SCHWANBORN R., VITAL H. (Eds). *Tropical Marine Environments of Brazil*. SPRINGER. 10.1007/978-3-031-21329-8 2023.
- ZULAR, A., SAWAKUCHI, A. O., WANG, H, GUEDES C.C.F., HARTMANN, G.A., JAQUETO, P.F., CHIESSI, C. M., CRUZ, F.W., GIANNINI P.C.F., DAROS, V.K., ATENCIO, D, TRINDADE, R.I.F. 2020. The response of a dune succession from Lençóis Maranhenses, NE Brazil, to climate changes between MIS 3 and MIS 2, *Quaternary International*, V: 537. 97-111p.