



Nathalia Cristina Cardoso de Azevedo

Análise dos dados de campos potenciais na transição continente-oceano da Bacia de Barreirinhas, Maranhão - Brasil

Niterói, RJ - Brasil

14 de março de 2022

Nathalia Cristina Cardoso de Azevedo

**Análise dos dados de campos potenciais na transição
continente-oceano da Bacia de Barreirinhas, Maranhão -
Brasil**

Projeto Final de Graduação em Geofísica
apresentado à Universidade Federal Flumi-
nense como exigência parcial para obtenção
do título de Bacharel em Geofísica

Universidade Federal Fluminense - UFF

Orientador: Rodrigo Bijani

Coorientador: Leandro de Sousa Batista

Niterói, RJ - Brasil

14 de março de 2022

Nathalia Cristina Cardoso de Azevedo

**Análise dos dados de campos potenciais na transição
continente-oceano da Bacia de Barreirinhas, Maranhão -
Brasil**

Projeto Final de Graduação em Geofísica
apresentado à Universidade Federal Flumi-
nense como exigência parcial para obtenção
do título de Bacharel em Geofísica

Avaliado pela seguinte comissão examinadora:

Rodrigo Bijani

Orientador- Universidade Federal
Fluminense (UFF)

Leandro de Sousa Batista

Coorientador- Sequeent

Nelson Ribeiro-Filho

Universidade Federal do Pará (UFPA)

Niterói, RJ - Brasil
14 de março de 2022

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha mãe Eneide Lima de Mesquita pelos anos de dedicação, compreensão e amor, além de todo o apoio incondicional para que eu consiga realizar e encerrar mais uma etapa da minha vida, sendo o meu maior exemplo de dedicação e perseverança entrando junto comigo na Universidade Federal Fluminense. Aos meus irmãos Naiades Lima Williams, Mariana Azevedo, Gabriella Maggessi e João Victor Azevedo por todo o suporte, apoio e principalmente por acreditarem em mim nos momentos em que mais precisei. Agradeço ao meu cunhado e super “dindão” Thiago Nunes, que junto da minha irmã Mariana Azevedo, foram grandes exemplos de dedicação, força e foco. Gostaria de agradecer à minha segunda mãe Isabel Cristina Fonseca que foi um dos pilares em minha vida, sempre acreditando e me apoiando das mais variadas formas. A minha filha Sofia Azevedo que veio para ressignificar a minha vida e meus objetivos me dando força e sendo a minha razão para seguir em frente na Geofísica. E a toda a rede de apoio, que são todas as pessoas acima, na criação dela e auxílio nas horas de dedicação ao curso. Aos melhores amigos que fiz durante essa graduação: Ibsen Gomes, Thais Sales, Eberton Rodrigues, Ana Carolina Ferreira Dominguez, Giulianna Oliveira, Marcos Oliveira, Stephanie Tavares, Amanda Bourguignon, Juliana Jannuzzi e Leonardo Viana. Obrigada por todos os momentos de alegria pelos corredores da UFF. Agradeço a todos os professores da Universidade Federal Fluminense por contribuírem para o meu crescimento acadêmico. Agradeço, em especial, ao colega Leandro Batista, que também me co-orientou, por muitos dias de aulas de Geosoft, por ter paciência de responder todas as minhas dúvidas. Ao Nelson Ribeiro-Filho por aceitar fazer parte dessa banca. E principalmente ao meu orientador Rodrigo Bijani, que foi peça fundamental na minha permanência na Geofísica, além de me ajudar a evoluir profissionalmente e pessoalmente. Muito obrigada por sempre me apoiar, acreditar e incentivar com muita compreensão sendo o pilar mais importante de toda minha trajetória estudantil. Agradeço à empresa Seequent pela disponibilidade de licenças estudantis. Por fim, gostaria de agradecer à Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis (ANP) pela concessão dos dados magnéticos, e ao Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG), órgão também da ANP pela disponibilização dos dados de gravidade.

*“Andar com fé eu vou, que a fé não costuma faiá.”
(Gilberto Gil)*

Resumo

O estudo das bacias sedimentares é fundamental para a Geociências, visto que são elas detém informações sobre a história tectono-sedimentar de uma região, além da possibilidade de ocorrência de hidrocarbonetos. A Bacia de Barreirinhas faz parte do grupo de bacias sedimentares brasileiras, sendo ela uma das cinco que compõem a margem equatorial brasileira. Embora sua evolução tectono-sedimentar seja relativamente conhecida, há ainda alguma inconsistência em relação aos seus limites e às principais estruturas, uma vez que poucos levantamentos geofísicos foram realizados na região, muito em função da baixa capacidade relativa de produção desta bacia. O presente trabalho utiliza dados dos campos potenciais na região da Bacia de Barreirinhas para estudar as principais estruturas, especialmente na transição da margem continental para a oceânica. Este estudo foi realizado através do processamento dos dados utilizando o software Oasis Montaj da empresa Seequent e aplicando uma metodologia baseada nas transformadas lineares no domínio do número de onda. Dessa forma, foi possível gerar insumos para avaliação. Os resultados obtidos corroboraram com as estruturas mais conhecidas da bacia, na qual foi bem delimitado os seus limites e as suas principais estruturas, como a Zona de Fratura Romanche que foi facilmente visualizada nos mapas dos dados magnéticos.

Bacia de Barreirinhas, Gravimetria, Magnetometria, Filtragem, Métodos Potenciais.

Abstract

The study of such rock structures is fundamental in Geosciences, since they hold the knowledge on the tectono-sedimentary history of a region, in addition to the possibility of occurrence of hydrocarbons. The Barreirinhas basin is part of the Brazilian group of sedimentary basins, being one of the five basins that comprises the Brazilian equatorial margin. Although its tectono-sedimentary evolution is relatively well known, there is still some inconsistency in relation to its limits and main structures, since few geophysical surveys were carried out in the region, largely due to the low capacity relative production of this basin. The present work uses potential-field data at Barreirinhas Basin region to study the main structures, especially the onshore-offshore transitions. This study was carried out through data processing using the Geosoft, software from the company Seequent, and applying a methodology based on linear transforms in the wavenumber domain. In this way, it is possible to generate inputs for evaluation. The results obtained corroborate with the best known structures of the basin, in which its limits were well defined and its main structures, such as the Romanche Fracture Zone, which was easily visualized on the magnetic data maps.

Keywords— Barreirinhas basin; Gravity; Magnetics; Wavenumber domain

Sumário

	Sumário	7
	Lista de ilustrações	9
1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	13
2	ÁREA DE ESTUDO	14
2.1	Localização	14
2.2	Contexto Geológico Regional	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	Métodos Potenciais Aplicados À Gravidade e Magnetismo	19
3.2	Método Gravimétrico	19
3.2.1	Densidade das rochas	20
3.2.2	Reduções gravimétricas	21
3.3	Método Magnético	22
3.4	Magnetismo em Materiais	24
3.4.1	Magnetismo das rochas	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Mapas temáticos	28
4.2	Software utilizado	28
4.3	Transformações lineares no domínio do número de ondas	28
4.3.1	Derivadas direcionais	29
4.3.2	Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	29
4.3.3	Inclinação do Sinal Analítico (ISA)	30
4.4	Processamento dos dados de gravidade	31
4.5	Processamento dos dados magnéticos	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	Dados magnéticos	35
5.1.1	Análise do Campo Magnético Anômalo	35
5.1.2	Primeira Derivada Vertical	37
5.1.3	Amplitude do Sinal Analítico	38
5.2	Dados de gravidade	39
5.2.1	Análise da Anomalia Bouguer	40

SUMÁRIO

8

5.2.2	Primeira Derivada Vertical	41
5.2.3	Amplitude do Sinal Analítico	42
5.2.4	Inclinação do Sinal Analítico	42
6	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa com a localização das principais bacias sedimentares brasileiras (Retirado de Jasper (2010)).	11
Figura 2 – Localização geográfica da Bacia de Barreirinhas (JASPER, 2010).	14
Figura 3 – Mapa Geológico com as principais informações sobre a Bacia de Barreirinhas.	15
Figura 4 – Representação esquemática do arcabouço estrutural da Bacia de Barreirinhas (JÚNIOR; MAESTU, 2018).	17
Figura 5 – Representação esquemática do arcabouço estrutural da Bacia de Barreirinhas retirado de Mohriak e Rosendahl (2003)	18
Figura 6 – Seção esquemática através da Terra mostrando as principais características do seu campo magnético (Adaptada de Isles e Rankin (2013)).	23
Figura 7 – Fotografias de rochas com Magnetita e Pirrotita (WIKIPÉDIA, 2021 ; WIKIPÉDIA, 2020).	25
Figura 8 – Modelo Digital de Terreno referente à área de estudo.	27
Figura 9 – Fluxograma básico de processamento dos dados de gravidade utilizado neste trabalho.	32
Figura 10 – Fluxograma básico de processamento dos dados magnéticos utilizado neste trabalho.	33
Figura 11 – Distribuição espacial do banco de dados utilizados neste trabalho. As cores representam os dados de anomalia Bouguer, já os dados em cinza é o Campo Magnético Anômalo.	34
Figura 12 – Mapa com o campo magnético Anômalo da região da Bacia de Barreirinhas.	36
Figura 13 – Mapa da Primeira Derivada vertical da região da Bacia de Barreirinhas.	38
Figura 14 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) da região da Bacia de Barreirinhas.	39
Figura 15 – Mapa da Anomalia Bouguer da região de estudo. As cruzes pretas são a localização das estações gravimétricas terrestres.	40
Figura 16 – Mapa da Primeira Derivada vertical da região de estudo.	41
Figura 17 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico da região de estudo.	42
Figura 18 – Mapa da Inclinação do Sinal Analítico da região de estudo.	43

1 Introdução

O estudo de bacias sedimentares pode ser considerado importante no contexto da Geofísica Aplicada. O conhecimento acerca da recarga hídrica de Bacias hidrográficas, a determinação do potencial exploratório de uma bacia sedimentar e as informações acerca da Geomorfologia de uma bacia são temas absolutamente relevantes para as diferentes áreas da Geociências. Cerca de 60 % do território brasileiro é composto por bacias sedimentares, a sua grande maioria localizada no interior, conforme ilustrado pela Figura 1. Podem ser divididas em três tipos:

1. Bacias sedimentares de grande extensão (bacia da Amazônia, do Parnaíba, também chamadas de Meio-Norte, do Paraná ou Paranaica e Central);
2. Bacias sedimentares de menor extensão: (bacias do Pantanal Mato-Grossense, do São Francisco, também denominada Sanfranciscana, do Recôncavo Tucano e a Litorânea);
3. Bacias de compartimentos de planalto: (bacias de Curitiba, Taubaté, São Paulo, entre outras).

Adicionalmente, o Brasil possui ainda nove bacias sedimentares que são notórias produtoras de hidrocarbonetos:

- Campos, no Rio de Janeiro, que é a maior produtora de petróleo do país;
- Espírito Santo, também possui reservas de petróleo significativas;
- Tucano e Recôncavo, na Bahia;
- Santos, bastante explorada atualmente, vai do litoral de Santa Catarina até o litoral do Rio de Janeiro;
- Sergipe-Alagoas;
- Potiguar, do oeste Ceará até a costa do Rio Grande do Norte; Ceará;
- Solimões, no Amazonas.

Dentro deste contexto, há outras cinco bacias sedimentares localizadas na faixa equatorial brasileira. São elas, Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Ceará, Potiguar e Barreirinhas.

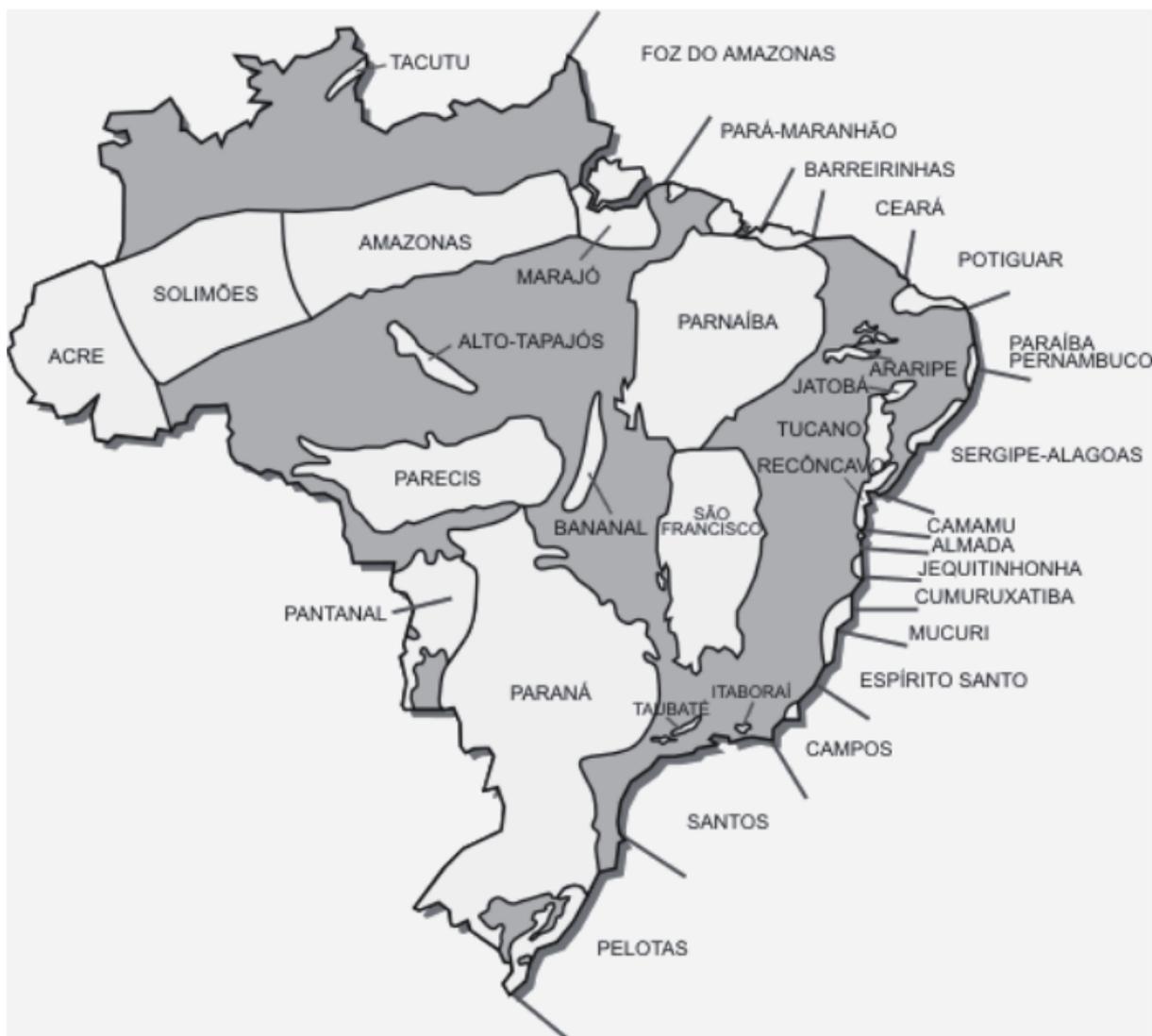


Figura 1 – Mapa com a localização das principais bacias sedimentares brasileiras (Retirado de Jasper (2010)).

A Bacia de Barreirinhas é uma das bacias que integram a Margem Equatorial Brasileira, sendo caracterizada por uma Margem Passiva. Localizada ao Norte, sua porção Onshore é limitada ao sul pela plataforma de Sobradinho e por uma série de falhamentos normais. Já ao norte, é delimitada pela linha de costa e a porção *offshore* se estende desde a linha de costa até o alto mar (PAMPLONA, 1969; MOHRIAK; ROSENDAHL, 2003). Segundo Lopes, Castro e Bertotti (2018), a evolução de uma bacia do tipo rifte ou margem passiva está relacionada à ascensão da Moho devido ao aumento de pressão ocasionada pelo aporte sedimentar e o relaxamento térmico associado à subsidência termal. Este é o caso da Bacia de Barreirinhas, sendo uma das principais bacias pertencentes à Margem Equatorial Brasileira.

Embora haja uma escassez de trabalhos geofísicos referente à Barreirinhas, podemos mencionar algumas contribuições recentes. Filho, Martins e Santos (2018) propuseram uma separação regional-residual na anomalia Bouguer utilizando a modelagem gravimétrica

crustal. O sinal gravimétrico regional foi calculado a partir da justaposição de prismas com densidades estabelecidas pelo modelo crustal GEMMA. A metodologia foi então aplicada na bacia de Barreirinhas, cuja complexidade geológica é considerada o principal entrave para a determinação da anomalia residual. O depocentro crustal foi mapeado entre falhas estruturais. Já [Júnior e Maestu \(2018\)](#) constroem modelos geofísicos e geológicos que representam a arquitetura interna e o preenchimento sedimentar da porção emersa da Bacia de Barreirinhas. Para isso, duas seções sísmicas 2D em conjunto com informações de cinco perfis geofísicos de poços foram analisados conjuntamente aos dados gravimétricos da região. Com a utilização dos atributos sísmicos foi possível verificar o predomínio de falhas lítricas de rejeito normal na sequência rifte e a cinemática transtensional de ocorrência posterior, associada à uma movimentação dextral durante a separação da América do Sul e África.

Há fortes indícios da presença de gás na porção Onshore da bacia, em analogia aos poços localizados em águas profundas na bacia do Tano, que seria uma bacia análoga na África ([ATTOH et al., 2004](#); [ANTOBREH et al., 2009](#)). Dessa forma, desperta-se um natural interesse em estudos mais aprofundados nas porções Onshore e Offshore. Por meio da utilização de dados geofísicos gravimétricos fornecidos pelo Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG) e magnéticos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), foi feito um estudo regional da bacia, onde serão analisados dados magnéticos e gravimétricos da região de transição entre continente e oceano.

A integração dos conhecimentos da geologia regional, o comportamento de campos potenciais, o processamento e interpretação dos dados através do software Geosoft da empresa Seequent possibilitaram uma mais apurada investigação da influência e da evolução tectono-deposicional da bacia ([JUNIOR et al., 2007](#); [JÚNIOR](#); [COSTA](#); [HASUI, 2008](#); [MONTENEGRO et al., 2020](#)).

O presente estudo foi desenvolvido para conclusão do curso de graduação em geofísica, e para tal contamos com dados de campos potenciais fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pelo Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNGD). Aqueles foram processados e correlacionados às informações geológicas já estabelecidas para a Bacia de Barreirinhas, com foco especial na região de transição do continente para o oceano. Para incorporar elementos mais consistentes à interpretação Geológica/Geofísica dos dados solicitados, contamos com algumas técnicas de realce baseadas em transformações dos dados para o domínio do número de ondas. Mapas temáticos foram produzidos e analisados em comunhão com o conhecimento geológico obtido durante o desenvolvimento deste trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é a análise integrada dos dados de campos potenciais para estudar as principais estruturas da Bacia de Barreirinhas, especialmente na transição entre as margens continental e oceânica. Dessa forma, pode-se adquirir um melhor reconhecimento e compressão em âmbitos não só exploratórios, como também geológicos em bacias com gênese semelhante (margem passiva). Em relação aos objetivos mais específicos deste trabalho, podemos mencionar:

- Utilização de dados aerogeofísicos para interpretação Geológico/Geofísica;
- Processamento dos dados de campos potenciais para realce de anomalias significativas no contexto geológico da Bacia de Barreirinhas;
- Confecção de mapas temáticos utilizando a experiência adquirida na utilização do software Oasis Montaj, da empresa Seequent;
- Detalhamento do mapa Geológico da região em estudo;

2 Área de estudo

2.1 Localização

A Bacia de Barreirinhas é uma das cinco bacias que fazem parte da Margem Equatorial Brasileira. Ocupando uma área de aproximadamente 46.000 km^2 , dos quais 15.000 km^2 são emersos (MOHRIAK; ROSENDAHL, 2003), a bacia encontra-se entre os meridianos 44° O e 42° O e os paralelos de 0° e 30° S , conforme pode ser visto na figura 2. Do tipo Margem Passiva, esta compreende uma porção Onshore, limitada a Sul, pela plataforma estrutural de Sobradinho e a Norte pela linha de costa e uma porção Offshore estendendo-se desde a linha de costa até alto mar, sendo limitada pelo Alto de Tutóia a Leste e pela Plataforma da Ilha de Santana a Oeste (PAMPLONA, 1969; MOHRIAK; ROSENDAHL, 2003).

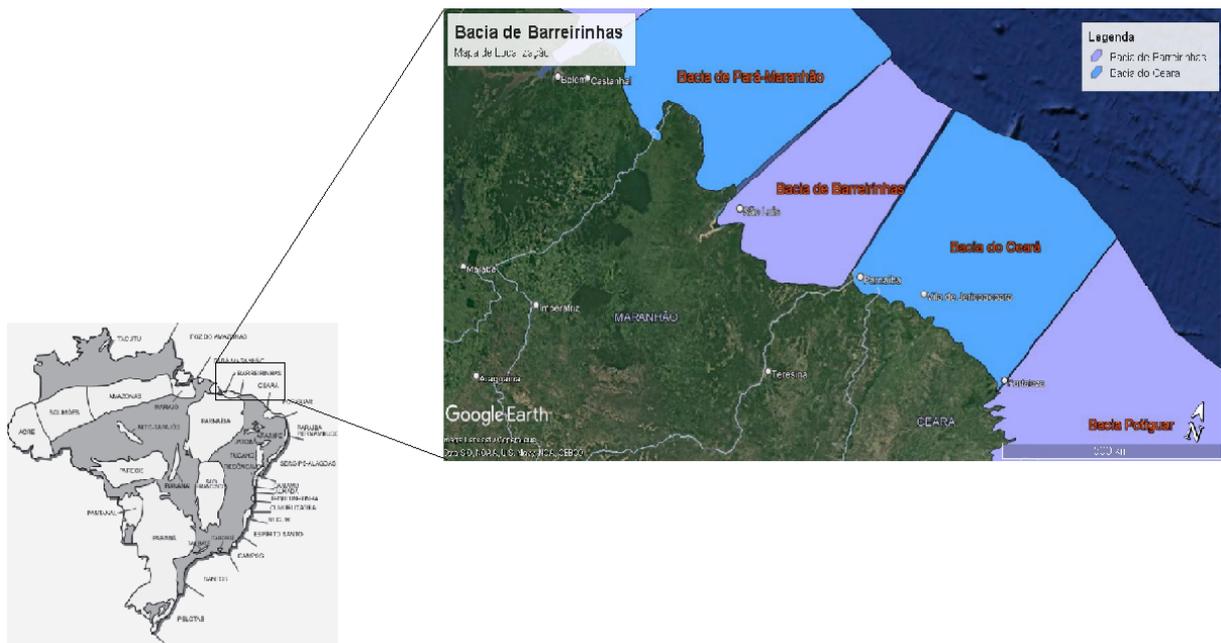


Figura 2 – Localização geográfica da Bacia de Barreirinhas (JASPER, 2010).

2.2 Contexto Geológico Regional

A Bacia de Barreirinhas é caracterizada como uma das cinco bacias que integram a margem equatorial brasileira. Essa teve seu desenvolvimento a partir do Arqueano, onde foi estabelecida a porção onshore. Já a offshore se deu durante o assentamento de Barreirinhas sobre a Bacia do Parnaíba, visto que, os mesmos elementos da coluna estratigráfica desta última são encontrados na Bacia de Barreirinhas. Pode-se destacar, mais precisamente, os

três grandes elementos do embasamento: Cráton São Luis (parte Arqueana), Faixa Gurupi e a Província Borborema (JUNIOR et al., 2007).

A gênese e desenvolvimento desta bacia relacionam-se à fragmentação do supercontinente Gondwana, mais precisamente, à separação dos continentes sul-americano e africano por meio de movimentações cisalhantes (JUNIOR et al., 2007). Tal fato possibilita o entendimento da Bacia de Barreirinhas como uma bacia de geometria rômbrica, com estruturas distensionais, cuja gênese encontra-se associada a regimes de transtração gerados por uma movimentação dextral e projeção em crosta continental da Zona de Fratura Romanche (AZEVEDO, 1986). Tal zona separa feições tectônicas distintas sendo que ao sul a bacia apresenta forte deformação por estruturas transpressionais de idade cenomaniana que decresce conforme se aproxima da borda sul, adquirindo um formato típico de bacia de margem passiva. Dessa forma, origina-se uma transição quase imperceptível para a Bacia do Pará-Maranhão. Para embasar as análises dos mapas temáticos de campo potencial produzidos neste trabalho, apresentamos o Mapa Geológico da região de Barreirinhas, adaptado da CPRM, conforme pode ser observado na Figura 3.

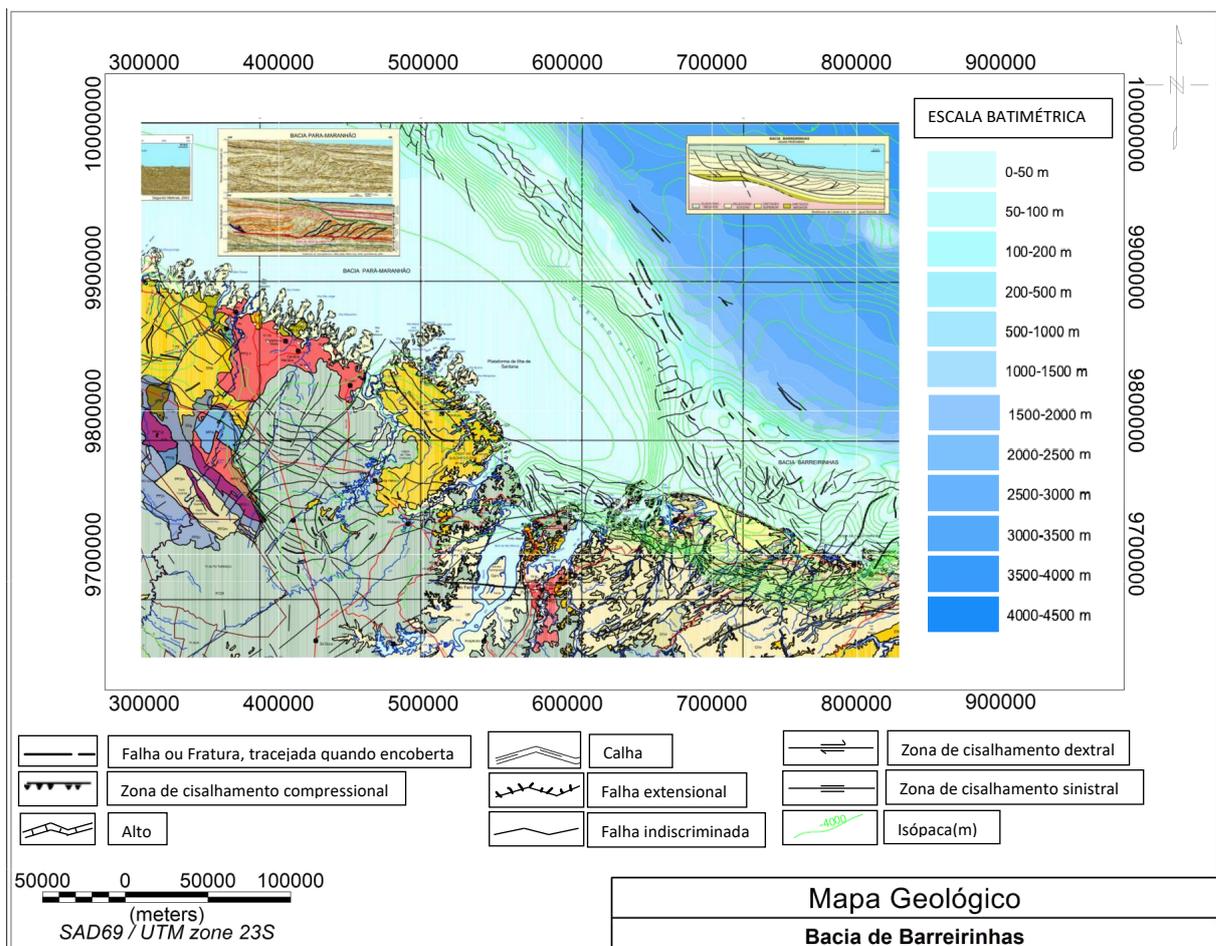


Figura 3 – Mapa Geológico com as principais informações sobre a Bacia de Barreirinhas.

É possível verificar que a Bacia de Barreirinhas é basicamente composta por falhas indiscriminadas, zonas de cisalhamento. Adicionalmente ao mapa Geológico, dados de

batimetria da região também foram disponibilizados, mostrando uma variação de 0 m na faixa costeira até cerca de 4500 m de profundidade na região profunda.

De acordo com [Milani et al. \(2007\)](#), considerando-se os movimentos que a geraram e o seu contexto tectônico, podemos agrupar as Bacias da Margem Continental brasileira em dois grandes grupos: Distensional e Transformante. Neste contexto, a Bacia de Barreirinhas encontra-se inserida no grupo de margem transformante, cuja origem está associada a um evento tectônico policíclico ([MONTENEGRO et al., 2020](#)) e um sistema de falhas do tipo continente-continente, responsável pela separação da África e América do Sul ([TAVARES, 2017](#)). Levando-se em consideração apenas os processos evolutivos é possível estruturar as Bacias da Margem Continental Brasileira através de um arcabouço fundamental composto por quatro megasequências: Supersequência Pré-rifte, Supersequência Sinrifte, Supersequência Pós-Rifte e Supersequência Drifte ([PAMPLONA, 1969](#); [MOHRIAK; ROSENDAHL, 2003](#); [JUNIOR et al., 2007](#); [AZEVEDO et al., 1985](#); [SOARES et al., 2007](#)).

A primeira, a fase Pré-rifte, entende-se como um estágio de sinéclise caracterizado pela sedimentação da Bacia do Parnaíba anterior ao desenvolvimento da Bacia de Barreirinhas. Este estágio é definido pelo acúmulo de tensões referentes ao estiramento da litosfera, resultando numa deformação dúctil e posterior à subsidência flexural da mesma ([CONCEICAO; ZALAN; WOLFF, 1988](#)). Segundo [Milani et al. \(2007\)](#), tais características promovem na bacia uma geometria do tipo sag, com leves mergulhos, ampla deposição e sem falhamentos acentuados. Por seguinte, tem-se o estágio Sinrifte, o qual é caracterizado por um aumento na subsidência mecânica gerada por intensos falhamentos normais dispostos em padrão *backstepping* e direção preferencial Oeste-Sudoeste ([JUNIOR et al., 2007](#)). De acordo com as ideias de [Milani et al. \(2007\)](#) e [Júnior e Maestu \(2018\)](#), esta segunda etapa caracterizou-se pela expansão da bacia associada à nucleação das discontinuidades em grandes falhas transcorrentes que foram ativadas e reativadas durante todo o período de separação dos continentes africano e sul-americano. Segundo ([SZATMARI et al., 2018](#)) tal procedimento influenciou fortemente o estilo estrutural da bacia, resultando na gênese de blocos falhados e rotacionados, com grandes depocentros relacionados a grábens rômnicos (Figura 4). A fase Pós-Rifte configura um período de contínua extensão lateral associado ao alívio de tensões e diminuição da intensidade da atividade tectônica, principalmente àquela associada às principais falhas normais ([JUNIOR et al., 2007](#)). Concomitante a isso, ocorre o desenvolvimento de uma segunda bacia em formato sag que, segundo [Júnior et al. \(2011\)](#), tem relação direta com a acentuação dos processos de subsidência térmica.

Dando continuidade às megassequências, tem-se a supersequência *Drift*. Esta é caracterizada pela progressiva separação dos continentes e instalação de uma crosta oceânica (período de Mar restrito) ([JUNIOR et al., 2007](#)). O início deste encontra-se demarcado em carta estratigráfica pela discordância *Breakup*, retratando a variação do regime tectônico atuante durante a sua passagem da sequência Pós-Rifte para Drifte. Durante o período de

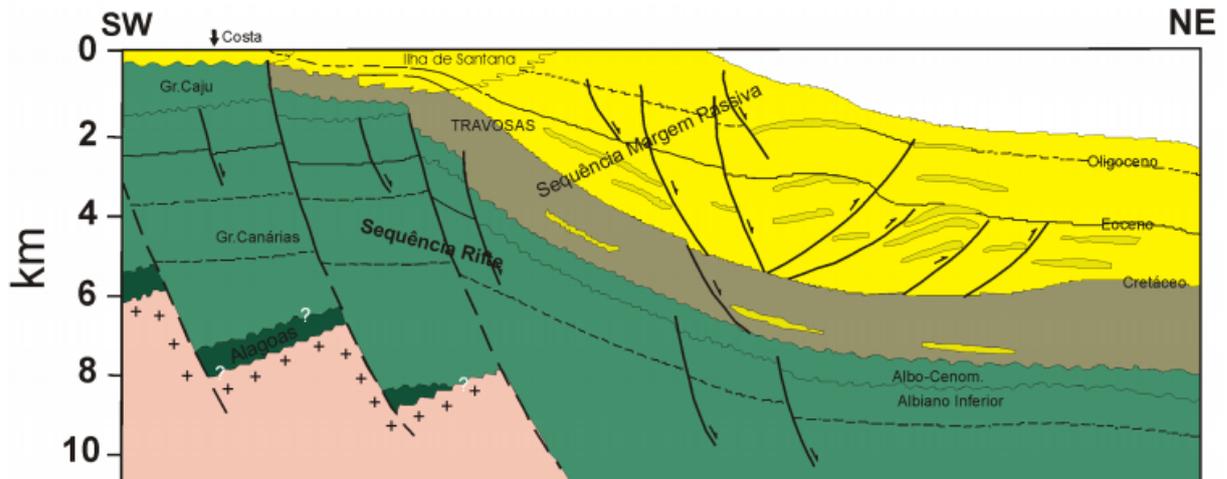


Figura 4 – Representação esquemática do arcabouço estrutural da Bacia de Barreirinhas (JÚNIOR; MAESTU, 2018).

deriva continental, desenvolveu-se, na área de estudo, um processo de basculamento, sendo este responsável pelo aumento do aporte sedimentar na bacia, permitindo o desenvolvimento do padrão sag na mesma (MILANI et al., 2007).

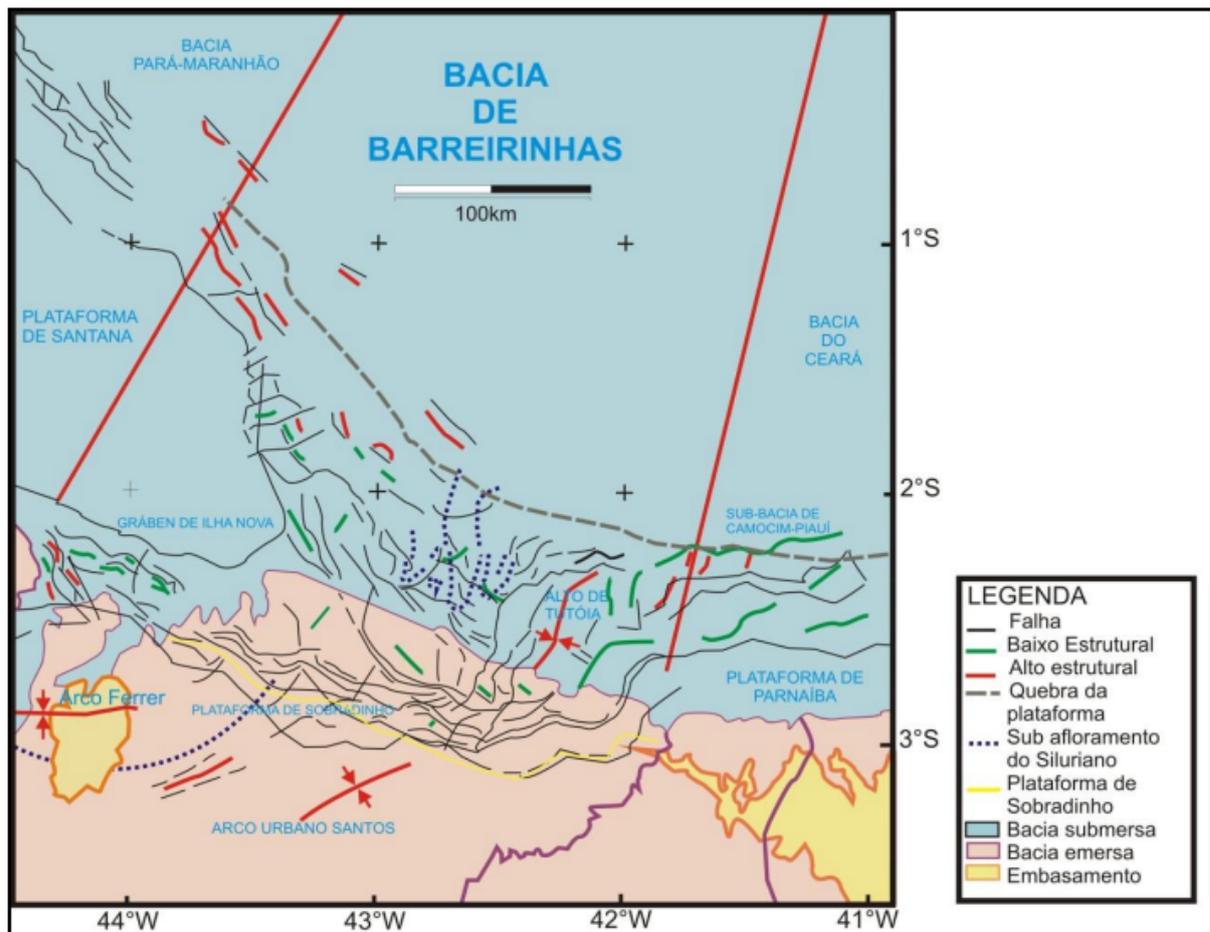


Figura 5 – Representação esquemática do arcabouço estrutural da Bacia de Barreirinhas retirado de [Mohriak e Rosendahl \(2003\)](#).

Por meio de estudos da atividade termal, de esforços tectônicos e até mesmo os tipos de falhas atuantes na região, [Pamplona \(1969\)](#) associou todos esses fatores às quatro etapas anteriores, caracterizando esta região como consequência de um complexo processo de cinemática transformante. A forte deformação gerada pela extensão da Zona de Fratura Romanche no extremo nordeste da bacia e na região oriental durante a fase rifte, possibilitou o desenvolvimento de vários dobramentos em échelon e formação de arcos anticlinais ([PAMPLONA, 1969](#); [ZALÁN, 2004](#)). Dando continuidade a esses estudos, [Woodcock e Fischer \(1986\)](#) confirmaram a geometria transtensional na região oeste da bacia. Por meio da retratação da natureza estrutural da bacia (Figura 5), compreendida por falhas normais paralelas e lítricas de direções WNW-ESE e NW-SE, pôde-se definir assim um sistema distensivo cortado por falhas transcorrentes mais recentes com orientação NE-SW ([PAMPLONA, 1969](#); [WOODCOCK; FISCHER, 1986](#); [ZALÁN, 2004](#)).

3 Fundamentação Teórica

Neste capítulo apresentamos, brevemente, os principais aspectos teóricos para a melhor compreensão deste trabalho. Inicialmente a teoria do potencial é apresentada a fim de justificar a natureza dos dados aqui utilizados. Em seguida, abordamos o básico para compreender a gravidade e o magnetismo quando a Terra é considerada.

3.1 Métodos Potenciais Aplicados À Gravidade e Magnetismo

Começamos esta seção destacando o teorema de Helmholtz. Este afirma, em linhas gerais, que qualquer campo vetorial \mathbf{B} com adequadas condições de contorno, pode ser representado pela seguinte expressão:

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \nabla U(x, y, z) + \nabla \times \mathbf{A}(x, y, z), \quad (3.1)$$

em que U é uma função escalar que depende da posição, aqui denotadas pela terna no sistema cartesiano (x, y, z) , ∇ é o operador diferencial Nabla e \mathbf{A} é uma função vetorial, chamada de potencial vetor. Vale salientar que a condição de contorno que anula as referidas quantidades no infinito deve ser satisfeita ([HOFMANN-WELLENHOF BERNHARD E MORITZ, 2005](#)). Quando o rotacional do potencial vetor \mathbf{A} é nulo, então o campo vetorial $\mathbf{B}(x, y, z)$ torna-se conservativo¹. Esta particularidade permite que $\mathbf{B}(x, y, z)$ seja determinado unicamente a partir do cálculo do gradiente de $U(x, y, z)$ (primeira parcela da Equação 3.1). Comumente, $U(x, y, z)$ é chamada de função potencial. No caso da gravidade, $\mathbf{B}(x, y, z)$ torna-se o campo gravitacional produzido por uma fonte de massa arbitrária, cujo função potencial é chamada de Newtoniana ou Gravitacional ([BLAKELY, 1996](#)). No caso do magnetismo, o campo $\mathbf{B}(x, y, z)$ é o campo magnético produzido por uma fonte magnética arbitrária. Ambos os campos vetoriais são calculados a partir das suas respectivas funções potenciais, fato que justifica a classificação destes no grupo dos métodos potenciais. Para mais detalhes acerca do tema, o leitor é convidado a ([BLAKELY, 1996](#); [TELFORD et al., 1990](#); [TORGE; MÜLLER, 2012](#); [GEMAEEL, 1999](#); [HOFMANN-WELLENHOF BERNHARD E MORITZ, 2005](#)).

3.2 Método Gravimétrico

A descoberta da força gravitacional por Galileu Galilei, em 1590, e sua quantificação por Isaac Newton, em 1687 podem ser considerados os principais eventos históricos

¹ o trabalho realizado pela força produzida pelo campo $\mathbf{B}(x, y, z)$ para mover uma partícula depende somente do ponto inicial e final

associados à gravitação. Basicamente, o método gravimétrico afere as variações no campo de gravidade da Terra (BLAKELY, 1996). Mesmo que em pequenas magnitudes, tais variações permitem deduções sobre a densidade e a forma dos alvos em subsuperfície. Essas variações são devido à heterogeneidades das rochas de formações adjacentes.

Pela teoria do potencial, podemos obter o campo gravitacional $\mathbf{g}(x, y, z)$ a partir do gradiente do potencial Newtoniano $U(x, y, z)$. Para isso, basta definir a forma geométrica das fontes de massa consideradas. Para o caso elementar de fontes pontuais, o potencial $U(x, y, z)$ ganha a seguinte forma (BLAKELY, 1996; HOFMANN-WELLENHOF BERNHARD E MORITZ, 2005):

$$U(x, y, z) = \gamma \int_V \frac{\rho(x', y', z')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV', \quad (3.2)$$

em que γ é a constante universal da gravitação V é o volume da fonte causadora, $\rho(x', y', z')$ é a distribuição de densidades que compõe a fonte, $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ é o vetor que identifica a posição da fonte em relação à observação. Para o caso de uma fonte esférica de massa M , a expressão fica simples ($U = \gamma \frac{\rho 4\pi R^3}{3}$). A resolução analítica da equação 3.2 fica inviável quando a forma e/ou a propriedade física da fonte em subsuperfície são desconhecidas. Dessa forma, diversas considerações geométricas e/ou analíticas são propostas na literatura para propor uma solução aproximada para o potencial $U(x, y, z)$ (BLAKELY, 1996; GEMAEL, 1999). Neste trabalho, estamos interessados em compreender como a medida da gravidade pode ser convertida em interpretação Geológica/Geofísica.

A prospecção gravimétrica possui uma ampla aplicabilidade, incluindo desde mapeamento de fontes em superfície até a determinação da espessura crustal. Para uma visão econômica, auxilia na identificação e avaliação do potencial de jazidas diversas, como: carvão, petróleo, sal, bem como matéria-prima para a indústria de cerâmica e construção civil (TELFORD et al., 1990; REYNOLDS, 2011).

3.2.1 Densidade das rochas

A magnitude do campo da gravidade em um ponto depende de cinco fatores, além da rotação da Terra: maré terrestre, latitude, elevação, topografia do terreno ao redor e variações de densidade das rochas de subsuperfície. O método está interessado em determinar a variação lateral de densidade sem a intervenção de outros fatores. Felizmente é possível remover a maioria dos efeitos que não estão relacionados à variação de densidade com alta precisão através de correções (TELFORD et al., 1990).

As rochas sedimentares possuem densidade menor que as rochas ígneas e as metamórficas (WILLIAM, 2007). O intervalo de densidade das rochas sedimentares é devido, principalmente, à variação em sua porosidade. Outros fatores que afetam a densidade das rochas são: composição, idade, história e profundidade em que se encontram (REYNOLDS, 2011). Em geral, a densidade aumenta em conjunto com a profundidade e o tempo. O

contraste de densidade entre formações sedimentares no campo é raramente maior que $0,25 \text{ g/cm}^3$ (TELFORD et al., 1990). Mesmo que em geral as rochas ígneas sejam mais densas que as sedimentares, há consideráveis exceções. Rochas vulcânicas extrusivas, particularmente lavas, geralmente têm alta porosidade e, conseqüentemente, baixa densidade. Geralmente, rochas ígneas básicas são mais pesadas que as ácidas. Porosidade, que afeta a densidade dos sedimentos de forma tão direta é de significância minoritária para a maioria das rochas ígneas e metamórficas a não ser que elas estejam fraturadas (TELFORD et al., 1990). A densidade costuma aumentar com o grau de metamorfismo, uma vez que esse processo tende a preencher os espaços porosos e recrystalizar a rocha em uma forma mais densa. Com raras exceções, minerais não metálicos têm densidade menor que a média das rochas da crosta superior (2.67 g/cm^3), são geralmente bem mais densos que essa média. Entretanto, como raramente ocorrem em grandes volumes, seu efeito normalmente não é vasto.

3.2.2 Reduções gravimétricas

A aquisição dos dados de gravidade requer diversos cuidados em relação à estação gravimétrica, especialmente uma acurada altimetria, uma vez que a gravidade depende fortemente da altitude (BLAKELY, 1996). Após a aquisição dos dados, é necessário realizar as reduções gravimétricas, uma vez que a gravidade observada possui influência de todas as fontes existentes, tais como o efeito de maré sólida e rotação da Terra, deriva instrumental e outros fatores associados (WILLIAM, 2007). Tais reduções podem ser divididas temporais e espaciais. As temporais podem ser sumarizadas como:

1. redução de deriva instrumental - remoção do efeito de desgaste do instrumento utilizado para a leitura das observações;
2. redução de maré - remoção do efeito de maré sólida que influencia o valor do campo de aceleração gravitacional devido à atração entre Terra e Lua. Trata-se de uma redução realizada durante a própria aquisição gravimétrica, devido à tecnologia apresentada na maioria dos gravímetros utilizados atualmente;
3. redução Eötvös - devido ao efeito de rotação da Terra que influencia a observação realizada em movimento. Para tal, é necessário conhecer a velocidade da plataforma e o rumo (direção) para que seja realizada a redução adequadamente (CARGNELUTTI et al., 2007).

Já as reduções espaciais são:

1. Redução de Latitude ou Redução à Terra Normal:

Realizada para calcular a anomalia da gravidade simples, onde comumente usa-se a Fórmula Internacional da Gravidade proposta por Li e Götze (2001). Basicamente,

considera-se a Terra como um elipsóide de revolução e calcula-se o valor da gravidade observada em uma determinada latitude. Por fim, o efeito de elevação deste referencial é matematicamente corrigindo;

2. redução Ar-livre (*Free-air*, em inglês)

efeito da altitude do ponto de observação, importante para calcular a anomalia de ar-livre, uma vez que o valor da gravidade diminui com a altitude (GEMAEL, 1999; ESCOBAR, 2000);

3. redução Bouguer - embora criteriosa (e muitas vezes inapropriada), elimina o efeito da ausência ou excesso de massa retirado e/ou preenchido em um nível de observação, fornecendo a anomalia Bouguer;

4. redução de terreno - realiza a compensação de massas topográficas associadas às proximidades das observações, tais como a presença de montanhas ou vales.

Cada uma das etapas de redução listadas acima são necessárias para que o dado bruto de gravidade seja transformado em anomalias específicas, como a Bouguer, fundamental para a interpretação Geológica/Geofísica voltada à exploração. Para maiores informações conceituais sobre cada etapa, o leitor é convidado a (ESCOBAR, 2000; BLAKELY, 1996; TELFORD et al., 1990).

3.3 Método Magnético

Um dos objetivos destacáveis de um aquisição magnética consiste na investigação das principais estruturas geológicas presentes na subsuperfície com base nas anomalias do campo magnético da Terra. Isso se deve às variações de propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície. Certos tipos de rocha contêm minerais magnéticos o suficiente para produzir anomalias magnéticas significativas. De modo similar, objetos ferrosos feitos pelo homem também geram anomalias magnéticas (BLAKELY, 1996; REYNOLDS, 2011). O levantamento magnético, assim, tem uma ampla variedade de aplicações, desde pequena escala para engenharia ou levantamentos arqueológicos para detectar objetos metálicos enterrados, até levantamentos de grande escala realizados para investigar estruturas geológicas regionais.

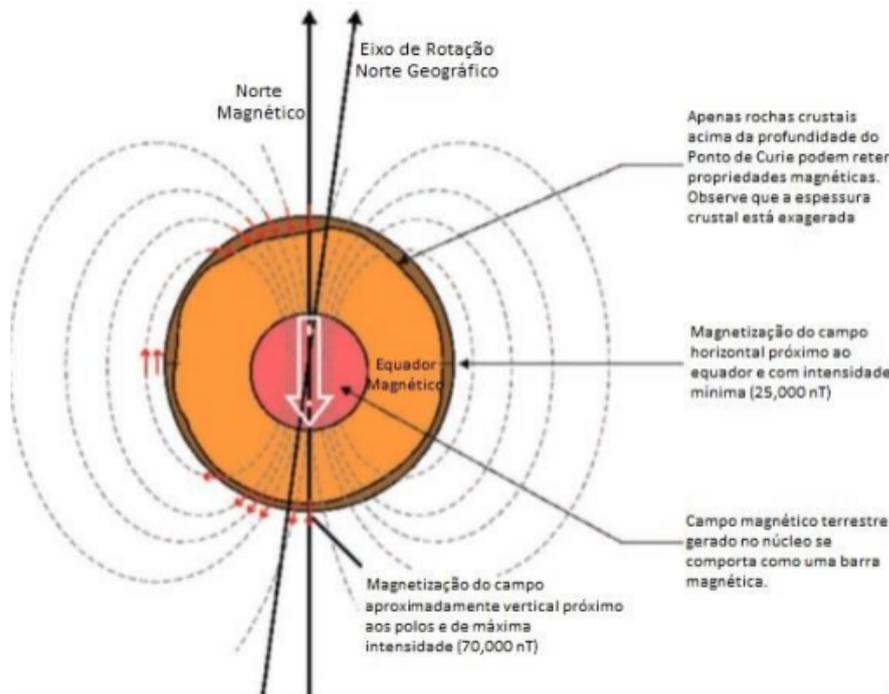


Figura 6 – Seção esquemática através da Terra mostrando as principais características do seu campo magnético (Adaptada de [Isles e Rankin \(2013\)](#)).

O campo magnético da Terra teve sua primeira investigação científica realizada pelo físico inglês Willian Gilbert. Este estudo mostrou, a grosso modo, que seu comportamento equivale ao de um ímã de barra com direção aproximada ao eixo de rotação da Terra ([TELFORD et al., 1990](#)). A magnetometria é, possivelmente, o método geofísico com estudos mais antigos ([TELFORD et al., 1990](#)). Mede-se a intensidade do campo magnético total da Terra, que é uma combinação do campo gerado no núcleo da Terra, do campo induzido pelas rochas crustais além do campo produzido pela interação Terra-Sol ([WILLIAM, 2007](#)). O parâmetro fundamental para a geração do campo induzido pelas rochas crustais é a susceptibilidade magnética das rochas. Essa propriedade indica a afinidade dos minerais constituintes da rocha em adquirirem magnetização, processo este chamado de indução magnética ([TELFORD et al., 1990](#); [WILLIAM, 2007](#); [REYNOLDS, 2011](#)).

Analogamente ao apresentado na seção 3.2, o campo de indução magnética também pode ser considerado, de forma aproximada, como um campo potencial, já que deriva do mesmo Teorema de Helmholtz. Com efeito, uma vez conhecido o potencial magnético $V(x, y, z)$ produzido por uma forma geométrica qualquer, obtem-se o campo de indução magnética desta configuração através do cálculo do gradiente do $V(x, y, z)$. Como sabemos, a forma geométrica mais elementar do magnetismo é o dipolo e o potencial magnético produzido pelo dipolo pode ser escrito como ([BLAKELY, 1996](#)):

$$V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -C_m \mathbf{m} \cdot \nabla \left[\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right], \quad (3.3)$$

em que \mathbf{m} é o momento de dipolo magnético, $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ é o vetor posição e C_m é a constante

magnética ($\frac{\mu_0}{4\pi}$). Aplicando o operador nabla na equação 3.3 obtém-se o campo de indução produzido por um dipolo magnético elementar:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = C_m \frac{m}{r^3} [3(\hat{\mathbf{m}} \cdot \hat{\mathbf{r}})\hat{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{m}}], \quad \mathbf{r} \neq 0 \quad (3.4)$$

em que $\hat{\mathbf{m}}$ e $\hat{\mathbf{r}}$ são os versores momento magnético e posição, respectivamente. Vale salientar que no caso da equação 3.4, para não sobrecarregar a notação, utilizamos $\mathbf{r}' = 0$. Para o caso do sistema Cartesiano de coordenadas, basta que $\hat{\mathbf{r}} = (r_x, r_y, r_z)$ e que $\hat{\mathbf{m}} = (m_x, m_y, m_z)$.

3.4 Magnetismo em Materiais

Todo átomo tem um momento magnético como resultante do movimento orbital de elétrons envolto de seus núcleos e do spin dos mesmos. De acordo com a teoria quântica, dois elétrons podem coexistir no mesmo nível eletrônico contanto que eles girem em direções opostas. O momento magnético desses elétrons, conhecidos como elétrons pareados, vão se cancelar. Na maioria dos casos, quando não há campo magnético externo aplicado, o spin do momento magnético de átomos adjacentes é distribuído aleatoriamente, então não há magnetização total. Devido ao momento magnético intrínseco dos átomos, eles se enquadram em uma ou mais das três principais classes de magnetização. São elas:

- Diamagnetismo:

Nestes materiais os níveis de energia são completos e não há elétrons despareados. Quando um campo magnético externo é aplicado, a magnetização é induzida. Os elétrons orbitam de uma forma há produzir um campo magnético oposto ao aplicado, originando uma susceptibilidade fraca e negativa (REYNOLDS, 2011). De forma geral, as características diamagnéticas não são observadas em aerolevantamentos em que há a presença de minerais ferromagnéticos (ISLES; RANKIN, 2013).

- Paramagnetismo:

Materiais que apresentam uma resposta de susceptibilidade magnética (k) pequena e de baixa amplitude. A contribuição de minerais paramagnéticos nas respostas de levantamentos aeromagnéticos é, em geral, desprezível. Entretanto, como no exemplo da halita, concentrações de minerais paramagnéticos em volume suficiente em bacias sedimentares podem ser discriminadas (ISLES; RANKIN, 2013).

- Ferromagnetismo:

Esses materiais exibem valores de susceptibilidade substancialmente altos. De maneira geral, a resposta em um levantamento magnético é composta pela distribuição destes minerais na área. Minerais ferromagnéticos incluem magnetita, pirrotita,

ilmenita dentre outros. As diferenças entre outras formas de elementos ferromagnéticos (Ferrimagnéticos, antiferrimagnéticos, etc.) raramente importam para um intérprete (WILLIAM, 2007; ISLES; RANKIN, 2013).

3.4.1 Magnetismo das rochas

De forma geral, a resposta magnética observada num levantamento decai com o aumento da oxidação, hidratação e/ou sulfetação dos minerais. A granulação de minerais ferromagnéticos também influencia na susceptibilidade do mineral, de modo que os mais finos possuem menor valor de susceptibilidade (ISLES; RANKIN, 2013).



Figura 7 – Fotografias de rochas com Magnetita e Pirrotita (WIKIPÉDIA, 2021; WIKIPÉDIA, 2020)

A interconectividade dos grãos também afeta a susceptibilidade. Por exemplo, uma magnetita maciça possui susceptibilidade maior que quando está com grãos dispersos com baixa ou nenhuma conectividade (ISLES; RANKIN, 2013). A magnetização observada num material rochoso é determinada pelos minerais magnéticos que a compõe. Essa magnetização é a somatória de duas magnetizações distintas:

1. Induzida;

A magnetização induzida ocorre a partir da interação entre o campo magnético da Terra e os minerais magnéticos contidos na crosta, de modo que é diretamente proporcional à susceptibilidade das rochas e de sentido igual ao do campo magnético indutor (REYNOLDS, 2011).

2. Residual ou Remanescente;

A magnetização residual ocorre devido ao alinhamento do campo magnético permanente em conjunto com o processo termal, químico ou físico nos minerais componentes da rocha. Este alinhamento, geralmente, independe do campo magnético terrestre. Durante o processo de resfriamento das rochas ígneas, registra-se a informação magnética referente ao momento em que a temperatura da rocha

diminui abaixo da temperatura de Curie. Este processo é responsável pela geração de magnetização termorremanescente em rochas ígneas ([TELFORD et al., 1990](#); [WILLIAM, 2007](#); [REYNOLDS, 2011](#))

4 Materiais e Métodos

Neste capítulo, os dados de campos potenciais solicitados junto à ANP foram trabalhados e analisados com o propósito de auxiliar na interpretação integrada da Bacia de Barreirinhas, especialmente na transição entre continente e oceano. O estudo envolve o Mapa Geológico da Bacia de Barreirinhas (Figura 3) e os dados aeromagnéticos e aerogravimétricos de projetos aerogeofísicos no formato XYZ com todas as etapas de pré-processamento executadas. Os dados de gravidade foram solicitados junto à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio da Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG). Adicionalmente, o modelo digital de terreno também foi obtido por intermédio do software Oasis Montaj (Figura 8). Infelizmente, os levantamentos não compartilham plenamente a área de investigação devido aos banco de dados serem diferentes.

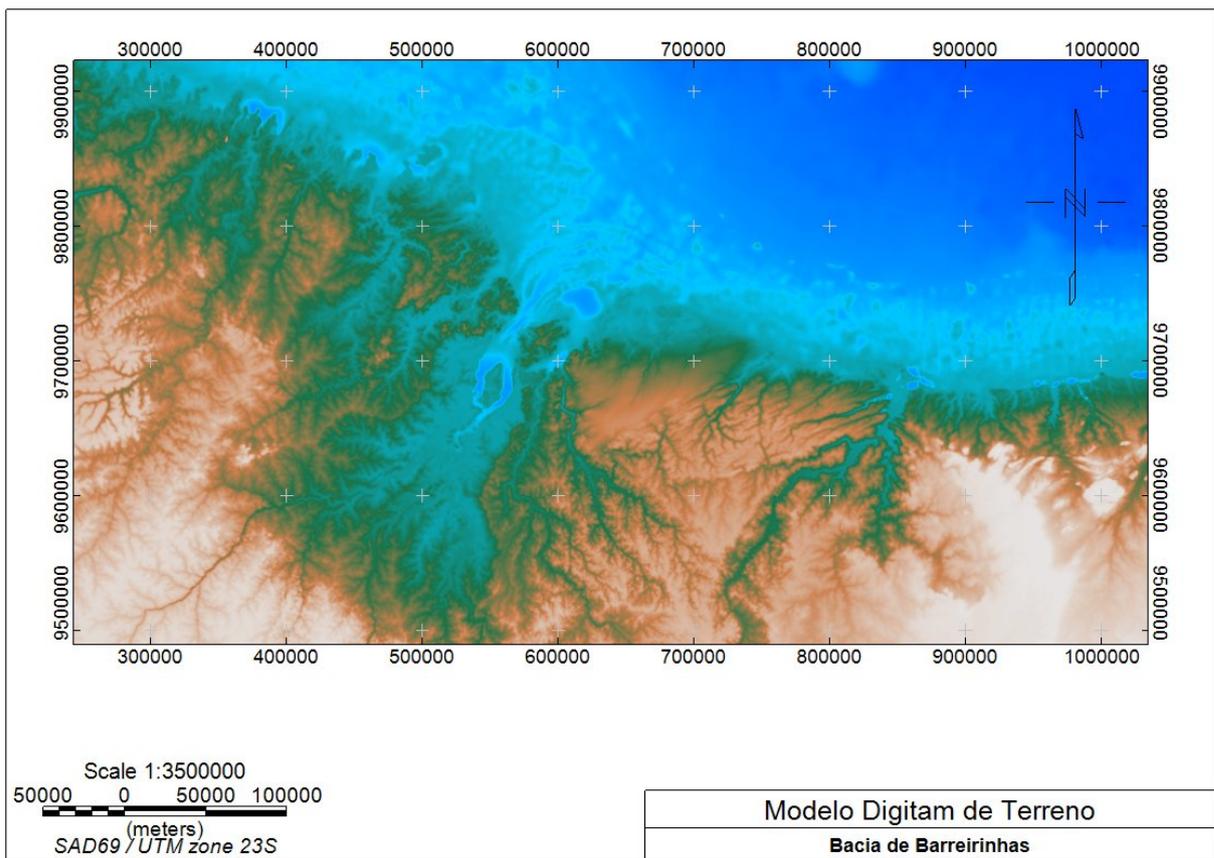


Figura 8 – Modelo Digital de Terreno referente à área de estudo.

4.1 Mapas temáticos

Neste trabalho, produzimos mapas temáticos cujo objetivo consiste em analisar as grandezas geofísicas e correlacioná-las com a Geologia da área de estudo, a fim de verificar as principais estruturas geológicas em subsuperfície. Para isso, técnicas de interpolação de dados se fazem necessárias para lograr êxito na confecção dos mapas.

A interpolação dos dados é utilizada para estimar os valores de um atributo em locais não amostrados utilizando pontos de amostragens obtidos em regiões próximas. O termo empregado para estes dados é a gridagem. O processo de gridagem estabelece um conjunto de dados regularmente espaçados sobre a área estudada. Na aquisição dos dados, a frequência destes ocorre em pontos aleatórios e irregularmente espaçados ou distribuídos em linhas. O processo de gridagem toma então os dados XYZ e os interpola para determinar os valores da grandeza no grid. Neste trabalho, a interpolação utilizada foi o Método da Mínima Curvatura, que segundo Briggs (1974), interpola os dados a serem gridados com uma superfície que tem as derivadas segundas contínuas. A referida técnica de interpolação ajusta uma superfície suavizada na qual todos os dados são atravessados.

4.2 Software utilizado

O Oasis Montaj versão 9.10 da empresa *Seequent* foi o software utilizado ao longo desse trabalho. Essa ferramenta nos permitiu operar diretamente com os bancos de dados dos projetos aerogeofísicos e, dessa forma, foi possível efetuar o processamento dos dados geofísicos. Além disso, através do Oasis Montaj foi possível integrar os produtos geofísicos provenientes do processamento dos dados com os demais materiais abordados neste trabalho como, por exemplo, o mapa geológico da Bacia de Barreirinhas. O Oasis Montaj também foi utilizado para gerar os mapas finais dos produtos do processamento de dados de aeromagnetometria e aerogravimetria.

4.3 Transformações lineares no domínio do número de ondas

Com o intuito de refinar a interpretação geológica/geofísica proposta no trabalho, diferentes técnicas de processamento dos dados de campos potenciais são utilizadas. Basicamente, são técnicas de realce baseados em derivadas direcionais dos dados. Para que essa etapa seja adequadamente aplicada, deve-se transformar os dados para o domínio do número de ondas, para que os cálculos sejam processados da forma mais simples e eficaz possível. Vale salientar que quando transformados ao domínio do número de ondas, os dados precisam basicamente de uma multiplicação por um coeficiente para que a operação de realce seja adequadamente realizada. Por isso, o nome da seção indica que as transformações são lineares (BLAKELY, 1996).

Nesta seção comentamos sobre como efetuar o cálculo das derivadas vertical e horizontais de um dado de campo potencial. O fluxo basicamente consiste em aplicar a transformada de Fourier no dado $P(x,y,z)$. Em seguida, operam-se multiplicações adequadas em relação ao tipo de derivação necessária. Ao final do processo, aplica-se a transformada inversa de Fourier para devolver o dado ao domínio espacial.

4.3.1 Derivadas direcionais

No domínio do número de ondas, as derivações são simplesmente representadas por uma multiplicação entre o dado transformado e o fator de derivação. É possível averiguar que as derivadas direcionais de ordem n de um dado potencial qualquer $P(x, y, z)$ podem ser efetuados a partir das seguintes expressões:

$$\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial x} = \mathcal{F}^{-1} \{ (ik_x)^n \mathcal{F}[P(x, y, z)] \}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial y} = \mathcal{F}^{-1} \{ (ik_y)^n \mathcal{F}[P(x, y, z)] \}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} = \mathcal{F}^{-1} \{ (\sqrt{k_x^2 + k_y^2})^n \mathcal{F}[P(x, y, z)] \}, \quad (4.3)$$

em que i é o número complexo ($\sqrt{-1}$), k_x é o número de onda na direção x , k_y o número de onda na direção y , o símbolos \mathcal{F} e \mathcal{F}^{-1} indicam a transformada de Fourier direta e inversa, respectivamente. As expressões 4.1 e 4.2 também são conhecidas como derivadas horizontais, enquanto que a expressão 4.3 é a derivada vertical. Fazendo $n = 1$, temos as derivadas de primeira ordem. Basicamente, a combinação das derivadas horizontais e vertical são a base para todas as técnicas de filtragem e realce utilizadas neste trabalho. Adicionalmente, perceba que a derivação é obtida por meio de uma simples multiplicação de um termo pela transformada de Fourier do dado de campo potencial. Ao final do processo multiplicativo, basta então aplicar a transformada inversa de Fourier para devolver o dado ao domínio original.

4.3.2 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

Os autores [Roest, Verhoef e Pilkington \(1992\)](#) mostraram que a Amplitude do Sinal Analítico (ASA) pode ser calculado à partir da combinação das derivadas horizontais e vertical de ordem $n = 1$ do dado de campo potencial:

$$|A(x, y, z)| = \sqrt{\left[\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial y} \right]^2 + \left[\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} \right]^2}. \quad (4.4)$$

Este filtro de realce destaca as principais variações do dado em todas as direções cartesianas, o que pode ser considerado uma importante contribuição na localização das inflexões de um determinada anomalia. Tal aspecto que pode ser útil na identificação de alvos, limites entre bacias sedimentares e lineamentos (REYNOLDS, 2011).

A Amplitude do Sinal Analítico (ASA) tende a centralizar maiores amplitudes sobre as suas respectivas fontes e através do seu produto podem ser visualmente identificados os principais domínios magnéticos na área de estudo. Logo, a amplitude do sinal analítico (ASA) em duas dimensões permite uma melhor definição das bordas dos corpos e suas geometrias e colabora na identificação de estruturas.

A representação analítica do campo magnético anômalo (CMA) tem a vantagem de produzir uma transformação cujas anomalias estão centradas nas bordas de suas fontes anômalas magnéticas. Como tal, permite maior facilidade na representação da posição dessas fontes, uma tarefa às vezes dificilmente realizada na representação do campo magnético anômalo, por exemplo.

4.3.3 Inclinação do Sinal Analítico (ISA)

A *Tilt Derivative* ou inclinação do sinal analítico (ISA) é um produto complementar do processamento de dados potenciais e, no geral, permite a estimativa do mergulho do gradiente das anomalias presentes. Dessa forma, é possível uma investigação geológica com ênfase na análise estrutural, como falhas geológicas, diques ou contrastes litológicos (MILLER; SINGH, 1994).

Descrita inicialmente por Miller e Singh (1994), a inclinação do sinal analítico é definida a seguir:

$$TDR(x, y, z) = \arctan\left(\frac{VD}{HD}\right), \quad TDR \in [-\pi/2, +\pi/2], \quad (4.5)$$

em que VD é a derivada vertical (i.e., $\frac{\partial P}{\partial z}$) e HD é o gradiente horizontal total:

$$HD = \sqrt{\left[\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial y}\right]^2}. \quad (4.6)$$

O *Tilt Derivative*, também chamado de Inclinação do Sinal Analítico, normaliza a derivada vertical em relação ao à amplitude do sinal analítico e, dessa forma, gera bons resultados mesmo na presença de ruídos (VERDUZCO et al., 2004). Através da equação 4.5 pode-se concluir que conteúdos de menor gradiente horizontal (i.e., Equação 4.6) apresentam o maior ângulo, diante disso o sinal produzido tende a se localizar sobre a fonte causadora. Em contraste com os conteúdos de maiores gradientes horizontais associados às bordas e limites dos corpos, que tendem a zero.

Cabe ressaltar que o produto da inclinação do sinal analítico é uma imagem mais densa de conteúdo quando comparado com os demais produtos do processamento de dados de magnetometria. Tal produto de ordem 0 pode-se apresentar com uma escala monocromática em preto e branco para facilitar a interpretação regional.

4.4 Processamento dos dados de gravidade

Os dados foram solicitados ao Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG). O dado disponibilizado encontra-se no formato adequado para que seja trabalho no software Oasis Montaj (i.e., extensão .XYZ). Um entrave consiste na ausência de um relatório técnico com informações mais específicas sobre os tipos de levantamento utilizados. Os dados disponíveis apresentam correções e processamento previamente realizados. Adicionalmente, foi estabelecida a conversão das latitudes e longitudes para o sistema UTM (Universal Transversa de Mercator), para que as transformações no domínio do número de ondas fossem adequadamente realizadas. Em resumo, os dados de gravidade disponibilizados requereram o seguinte trabalho:

- Conversão para coordenadas UTM;
- Interpolação pelo método da mínima curvatura para produzir o mapa da anomalia Bouguer;
- Aplicação das técnicas de realce no domínio do número de ondas.

A figura 9 mostra as etapas de filtragem dos dados de gravidade para realce das feições estruturais interessantes para a interpretação.

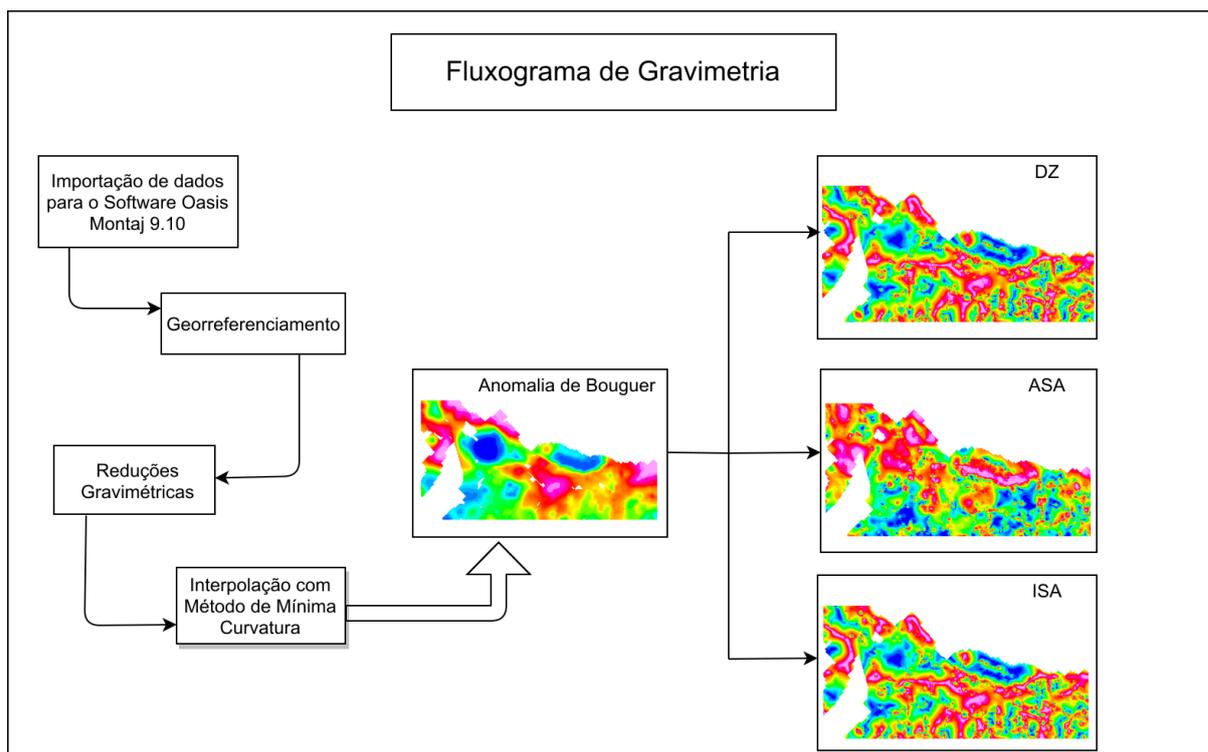


Figura 9 – Fluxograma básico de processamento dos dados de gravidade utilizado neste trabalho.

Para produção do mapa referente a anomalia bouguer, o método da mínima curvatura foi novamente utilizado. Neste caso, não foi especificado o tamanho da célula de interpolação, devido a ausência dessa informação no relatório técnico.

4.5 Processamento dos dados magnéticos

O banco de dados magnéticos possui uma área efetiva de 80.8 km^2 na Plataforma Continental da bacia de Barreirinhas e foi disponibilizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) devidamente processado. Os dados foram adquiridos através de um aerolevante realizado pela Petrobrás com direção de voo perpendicular à linha de costa, espaçamento de 2500 metros e altura de voo de 400 metros. Para análise exploratória dos dados magnéticos, produzimos os seguintes mapas: Campo Magnético Anômalo (CMA), Derivada Vertical (DZ), Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Inclinação do Sinal Analítico (ISA). As etapas do processamento podem ser facilmente visualizadas na Figura 10.

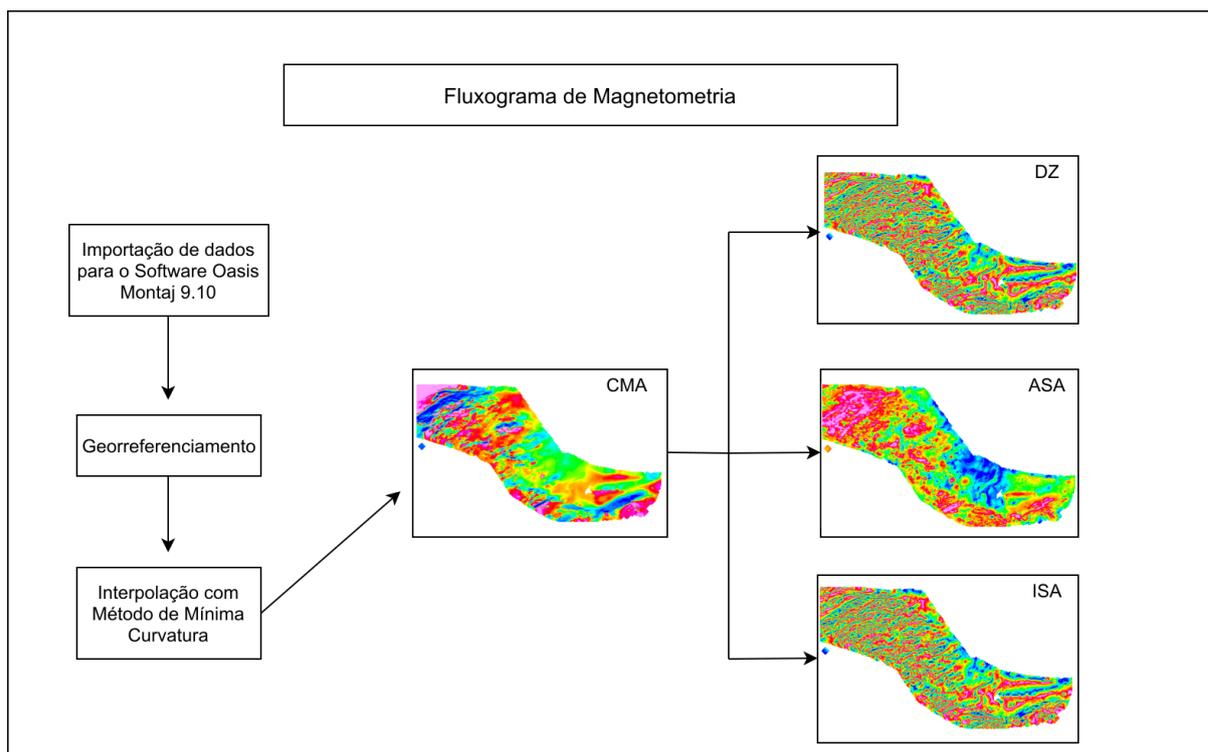


Figura 10 – Fluxograma básico de processamento dos dados magnéticos utilizado neste trabalho.

A fim de produzir uma imagem relativa aos dados magnéticos, submetemos o canal do campo magnético anômalo ao processo de interpolação por intermédio do método de mínima curvatura. A gridagem da área corresponde à $\frac{1}{5}$ do espaçamento entre as linhas de voo, evitando assim interpolação excessiva. Visto que os dados fornecidos continham locais não amostrados, foi necessário interpolar dados usando pontos conhecidos nas regiões adjacentes. Para maiores informações, o leitor é convidado a ler [Siemon et al. \(2020\)](#).

5 Resultados e Discussões

O presente capítulo expõem os resultados obtidos do processamento de dados de campos potenciais, gerando mapas temáticos para eventuais correlações entre o dado processado e o conhecimento geológico da bacia. Adicionalmente, buscamos enriquecer as informações relevantes contidas nos dados estruturas observadas no mapa geológico da Bacia de Barreirinhas. Vale ressaltar que é possível visualizar a diferença de localização dos dados fornecidos sobrepondo os mapas, como pode ser visto na figura 11. Este mapa evidencia que os dados gravimétricos, em sua maioria, localizam-se na parte onshore da bacia, e os dados magnéticos na parte offshore, porém ambos cobrem a transição do continente-oceano que é região de interesse neste trabalho.

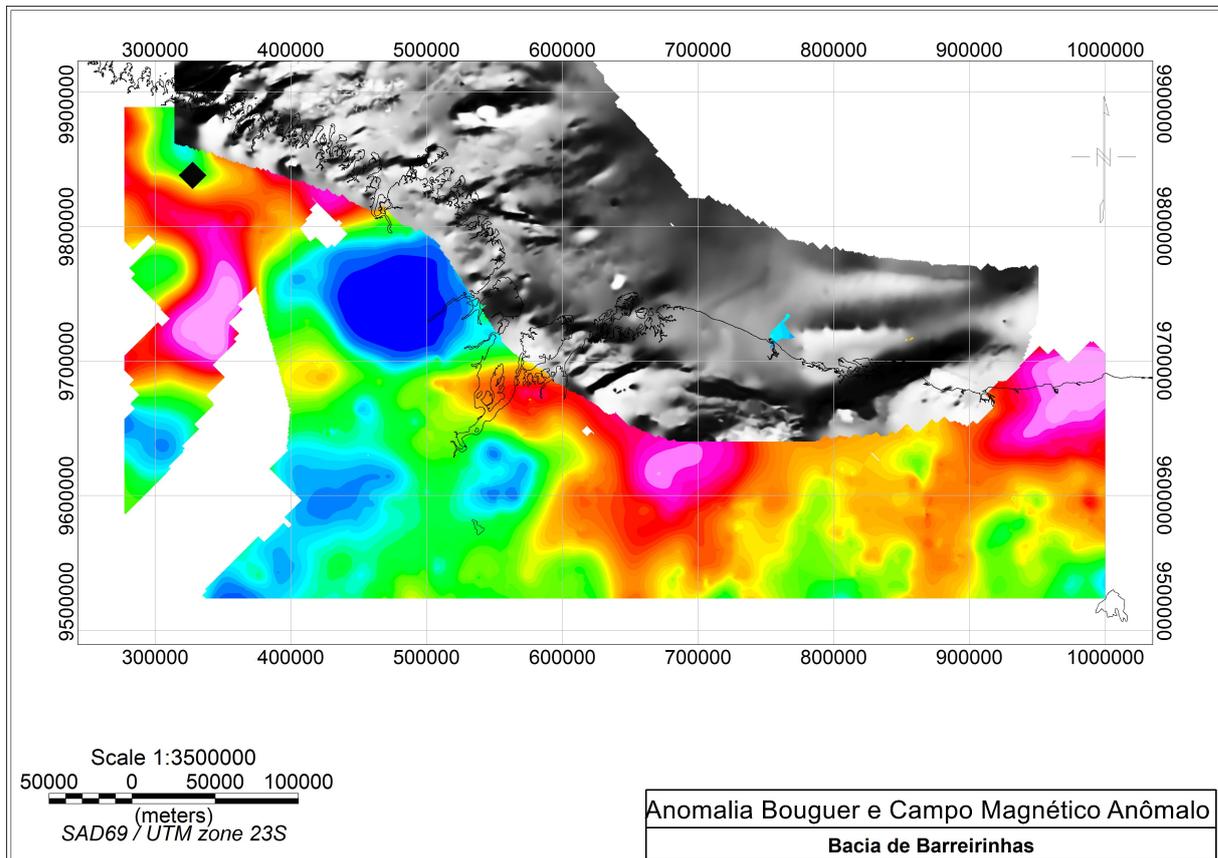


Figura 11 – Distribuição espacial do banco de dados utilizados neste trabalho. As cores representam os dados de anomalia Bouguer, já os dados em cinza é o Campo Magnético Anômalo.

5.1 Dados magnéticos

Para entender a relação entre anomalia e fonte causadora, são utilizadas técnicas de realce nas quais permitem destacar anomalias e ressaltar características geofísicas-geológicas importantes como, os limites das anomalias magnéticas, identificação de falhas geológicas e entre outros.

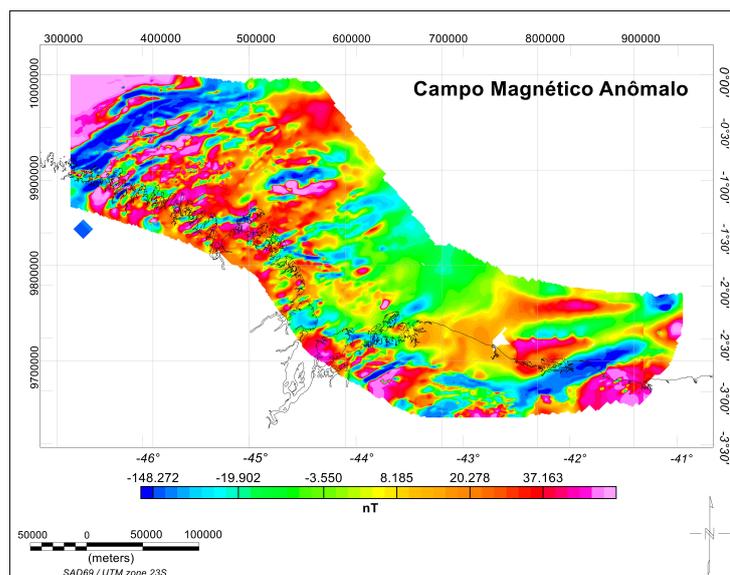
Considerando que a área de estudo é uma região marcada por intensos processos tectônicos associados à abertura do Oceano Atlântico com movimentos distensionais e transformantes, utilizamos a magnetometria para uma análise regional das principais feições associadas à evolução tectônica da Bacia de Barreirinhas. Por conta disso, trabalhou-se com:

- Campo Magnético Anômalo (CMA);
- Primeira Derivada Vertical (Dz);
- Amplitude do Sinal Analítico (ASA);
- Inclinação do Sinal Analítico (ISA);

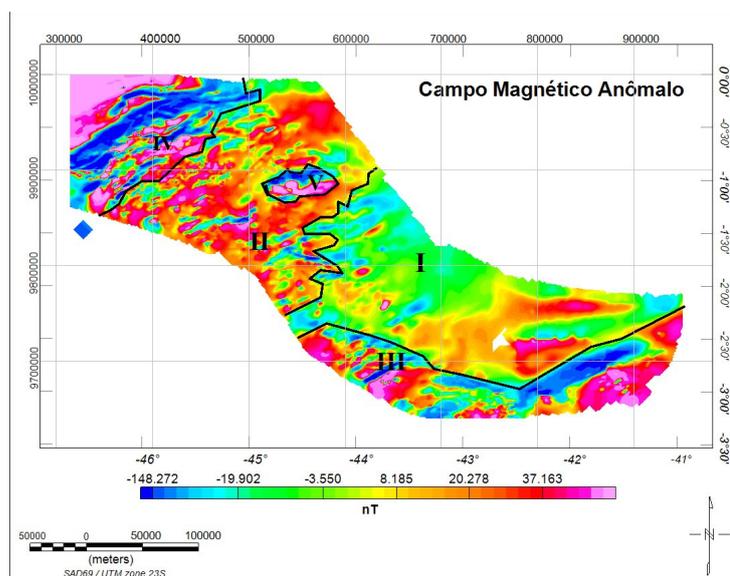
A partir das técnicas de realce destacadas acima, buscamos relacionar as características das principais feições e, com isso, estabelecer potenciais domínios magnéticos regionais, lineamentos e outras feições de destaque.

5.1.1 Análise do Campo Magnético Anômalo

Na figura 12 (a) foi possível observar as principais características das anomalias magnéticas tais como a forma, a direção e a disposição e, além disso, foi possível definir os domínios magnéticos que compõem a área de estudo. Nesse sentido, a partir do CMA observa-se que as anomalias magnéticas estão dispostas preferencialmente na direção NE-SW de forma linear e bem definida, onde há um domínio de falhamentos normais na parte ocidental da bacia visto pela forte variação de altos e baixos magnéticos indicando a presença de estruturas profundas coincidente com a Zona de Fratura Romanche.



(a) Mapa com linhas de costa



(b) Mapa dividido em domínios magnéticos

Figura 12 – Mapa com o campo magnético Anômalo da região da Bacia de Barreirinhas.

Os domínios magnéticos foram estabelecidos a partir da similaridade dos comprimentos de onda observados no campo magnético anômalo, sendo um aspecto bastante intuitivo e interpretativo do processo. A figura 12(b) apresenta uma proposta de divisão dos dados em domínios magnéticos. As anomalias presentes no Domínio Magnético IV podem ser visualizadas na forte oscilação de altos e baixos magnéticos onde a bacia encontra-se fortemente deformada por estruturas transpressionais existentes na região noroeste condizentes com a grande extensão da Zona de Fratura Romanche. Diante disso, podemos dizer que a Bacia de Barreirinhas é dominada por falhas em suas bordas. Na sua transição do continente para oceano podemos visualizar que essas deformações diminuem à medida que adentramos na Bacia de Barreirinhas, revelando uma transição com estruturas

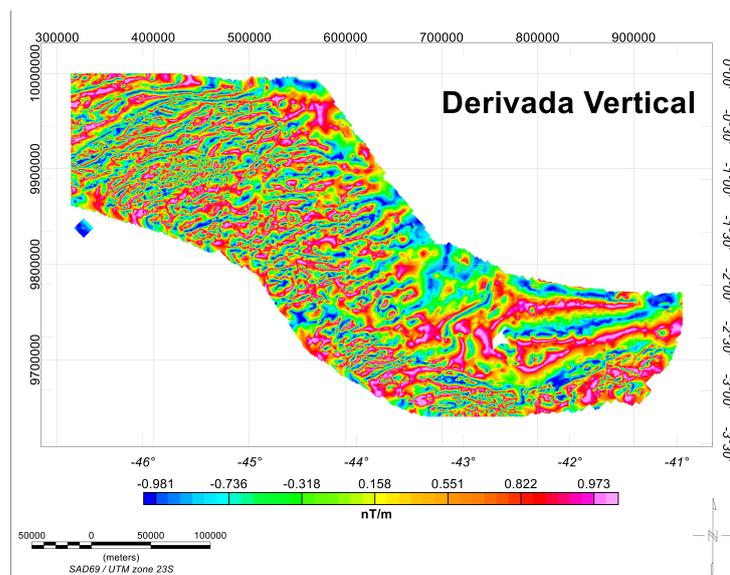
mais estáveis apontando características de uma margem passiva.

No Domínio Magnético III podemos ver formas diferentes de anomalias na direção E-W na qual podemos relacionar, segundo (AZEVEDO, 1986), com a presença dominante de eixos sinclinais em “échelon”. Fica evidente na interpretação dos domínios magnéticos que a transição entre o Domínio Magnético III e I é abrupta coincidindo com o formato e região da linha de costa.

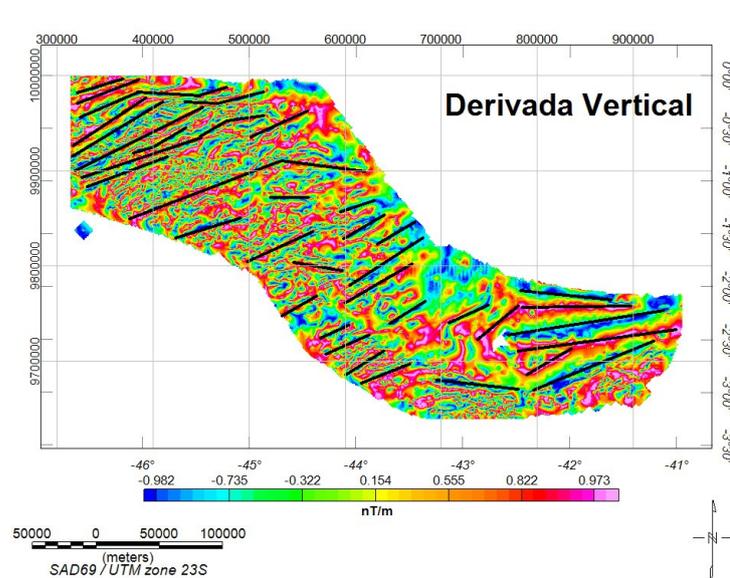
O domínio V destaca anomalias dipolares de curto comprimento de onda encontrados na bacia. Percebe-se que em todo o banco de dados há somente uma anomalia significativa referente à este domínio. Tal anomalia pode estar relacionada com o grábem de São Luis.

5.1.2 Primeira Derivada Vertical

A figura 13 (a) mostra o mapa da primeira derivada vertical da região de estudo. Visto que o cálculo da derivada vertical realça as altas frequências do sinal, podemos observar uma série de lineamentos, confirmando a direção NE-SW dos falhamentos e estruturas mais rasas, conforme pode ser visto na Figura 13 (b).



(a) Mapa simples.



(b) Mapa com a interpretação dos lineamentos.

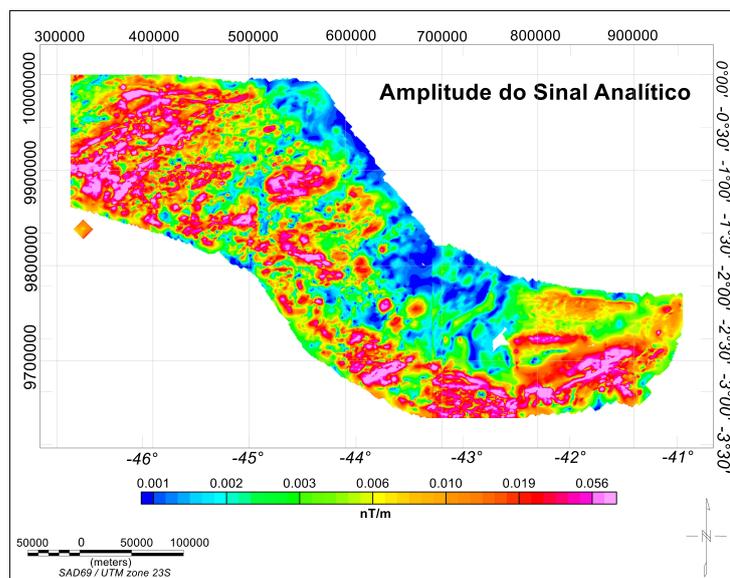
Figura 13 – Mapa da Primeira Derivada vertical da região da Bacia de Barreirinhas.

Os lineamentos interpretados na figura 13 (b) estão em acordo com o mapa geológico apresentado na seção 2.2.

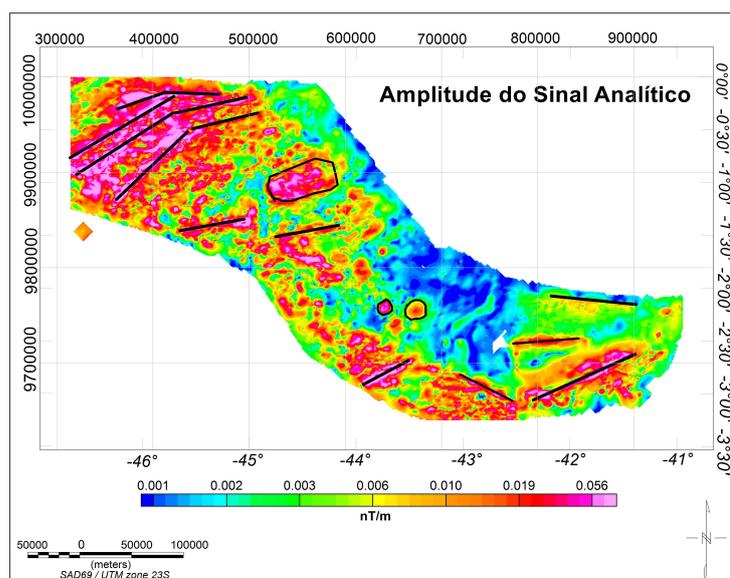
5.1.3 Amplitude do Sinal Analítico

A figura 14 (a) mostra o mapa da amplitude do sinal analítico da região de estudo. Podemos visualizar o realce das bordas de corpos largos possibilitando uma melhor identificação dos principais contatos. Observamos também que o ASA diminui conforme se afasta da linha de costa ao longo de todo o mapa, de forma abrupta, com amplitudes mínimas na parte offshore da bacia. Este aspecto pode estar relacionado à variação crustal na região de transição entre o continente e o oceano, especialmente em relação às derivadas

horizontais.



(a) Mapa simples.



(b) Mapa com a interpretação de algumas estruturas.

Figura 14 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) da região da Bacia de Barreirinhas.

5.2 Dados de gravidade

Analogamente aos apresentado na seção anterior, aplicamos as mesmas técnicas de realce (Primeira Derivada Vertical, Amplitude e Inclinação do Sinal Analítico) aos dados de Anomalia Bouguer. A fim de gerar mapas foi necessário utilizar o Método de Mínima Curvatura (MMC) para interpolar os dados fornecidos e gerar mapas de forma mais satisfatória.

No entanto, devido o relevo da superfície da Moho ser uma fonte gravimétrica intensa e o fato da Bacia de Barreirinhas estar localizada junto à margem continental, a sobreposição da geometria do topo e da base da crosta produz um sinal gravimétrico (especificamente a Anomalia de Ar-Livre) característico com forma de dois lóbulos, um negativo e outro positivo (ALLEN; ALLEN, 2013).

5.2.1 Análise da Anomalia Bouguer

A figura 15 apresenta o mapa da Anomalia Bouguer completa da região onshore da Bacia de Barreirinhas. É possível notar a presença de altos e baixos gravimétricos coerentes com a localização da Zona de Fratura Romanche (AZEVEDO, 1986), além das falhas e dobras relacionadas ao contexto movimentação cisalhantes (SOARES et al., 2007) em que a bacia está inserida.

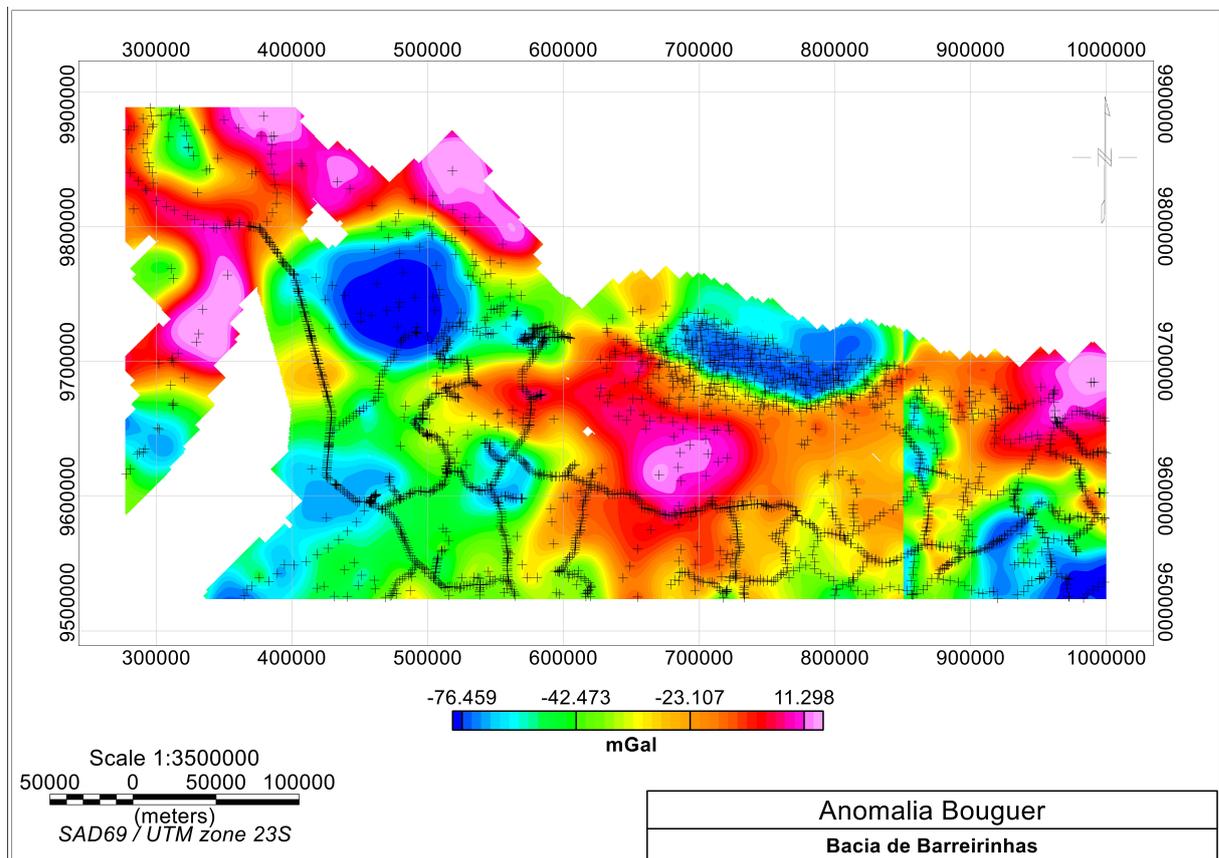


Figura 15 – Mapa da Anomalia Bouguer da região de estudo. As cruzes pretas são a localização das estações gravimétricas terrestres.

A anomalia Bouguer compreende amplitudes variadas porém predominantemente negativas, apresentando uma assinatura bilobular com valores entre -60 mGal e -76 mGal na região de transição continente-oceano. A assinatura bilobular pode ser compreendida como o depocentro da Bacia de Barreirinhas, onde possivelmente é produzida devido ao arranjo geométrico topo da crosta com relevo abrupto e base da suave (WATTS, 2001). Esta

característica pode estar associada ao relevo da superfície, a elevação e o afundamento, da superfície da Moho (FILHO; MARTINS; SANTOS, 2018). Estas amplitudes extremamente baixas estão relacionadas com a presença de grabens devido a influência das Bacias do Parnaíba e de São Luís. Podemos observar dois lóbulos extremamente positivos no continente na região central e oeste do mapa influenciados pela presença do Cráton São Luís e dos arcos que demarcam a região com ocorrência de falhas (i.e., Zona de Fratura Romanche, falhas relacionadas à movimentos cisalhantes) (AZEVEDO, 1986; JÚNIOR; MAESTU, 2018). O depocentro da Bacia de Barreirinhas coincide então com a localização estabelecida para o Cráton de São Luis.

5.2.2 Primeira Derivada Vertical

A figura 16 apresenta o mapa da primeira derivada vertical, onde foi possível visualizar variações do sinal gravimétrico em profundidade que demarcam algumas das estruturas mais rasas da bacia. Dessa forma, as altas e baixas amplitudes evidenciam o arco estrutural, além de marcar a linha de costa, como pode ser visto na parte central do mapa 16.

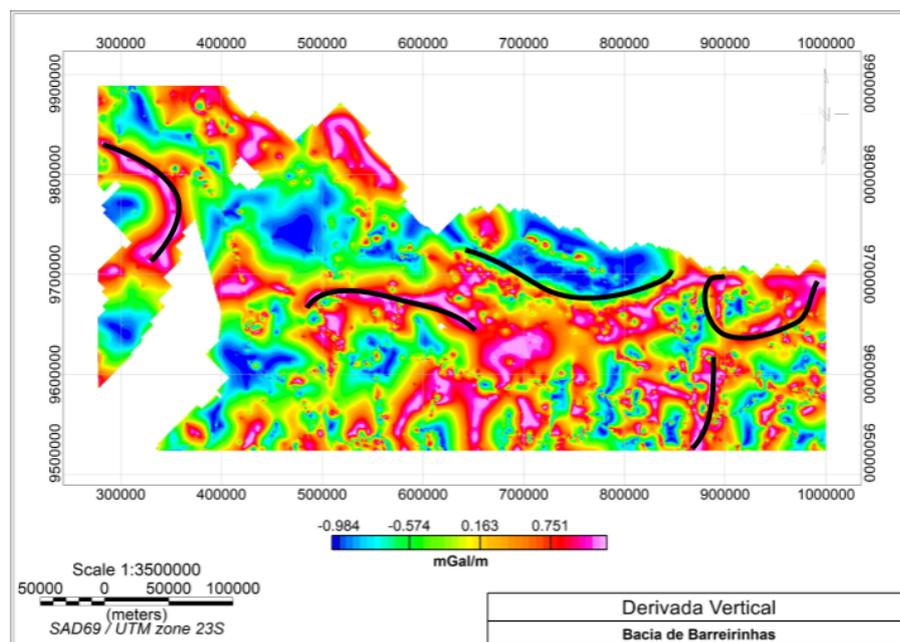


Figura 16 – Mapa da Primeira Derivada vertical da região de estudo.

A figura 16 também elucidada o Alto de Tutóia (extrema direita do mapa) na qual é a região delimitante entre as Bacias de Barreirinhas e do Ceará. Adicionalmente, pode-se observar a presença da Plataforma de Sobradinho na faixa central do mapa, demarcando a porção emersa da bacia.

5.2.3 Amplitude do Sinal Analítico

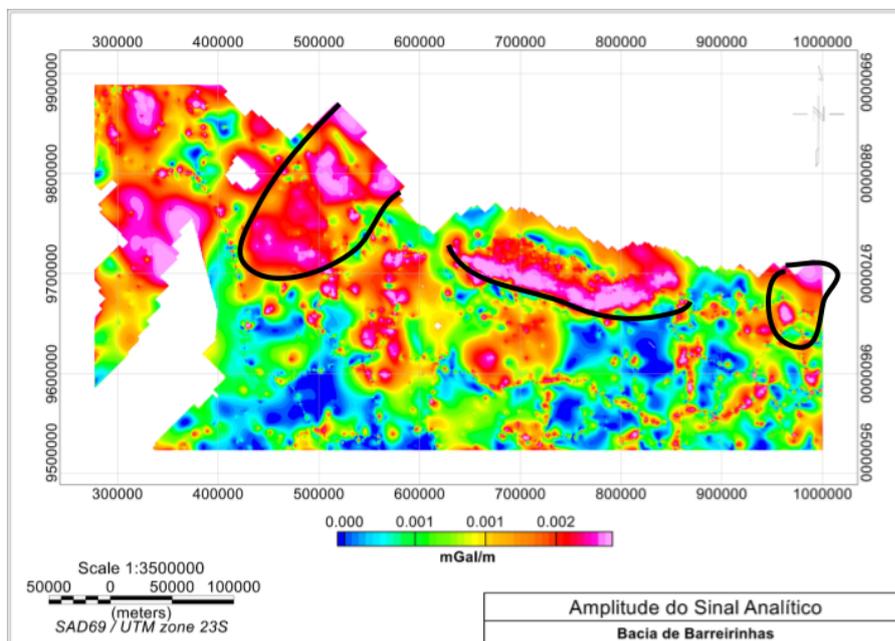


Figura 17 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico da região de estudo.

A figura 17 mostra o mapa da Amplitude do Sinal Analítico da Anomalia Bouguer. Foi possível observar que os contornos de algumas estruturas da bacia foram delineadas, como por exemplo na região de transição. Adicionalmente, podemos observar severa influencia de ruídos nos dados, o que é amplificado na aplicação deste filtro. O Alto de Tutóia também pode ser observado no mapa ASA. As amplitudes mais elevadas na região noroeste do mapa podem estar relacionadas com os altos estruturais presentes na Plataforma da Ilha de Santana e região de transição para Bacia de São Luís.

5.2.4 Inclinação do Sinal Analítico

A figura 18 apresenta o mapa da Inclinação do sinal analítico calculado a partir da Anomalia Bouguer. Não é possível observar variações expressivas das amplitudes deste sinal, podendo indicar que as estruturas significativas da região estudada não estão associadas a alguma direção preferencial de mergulho. Dessa forma, este sinal é pouco relevante para uma análise interpretativa.

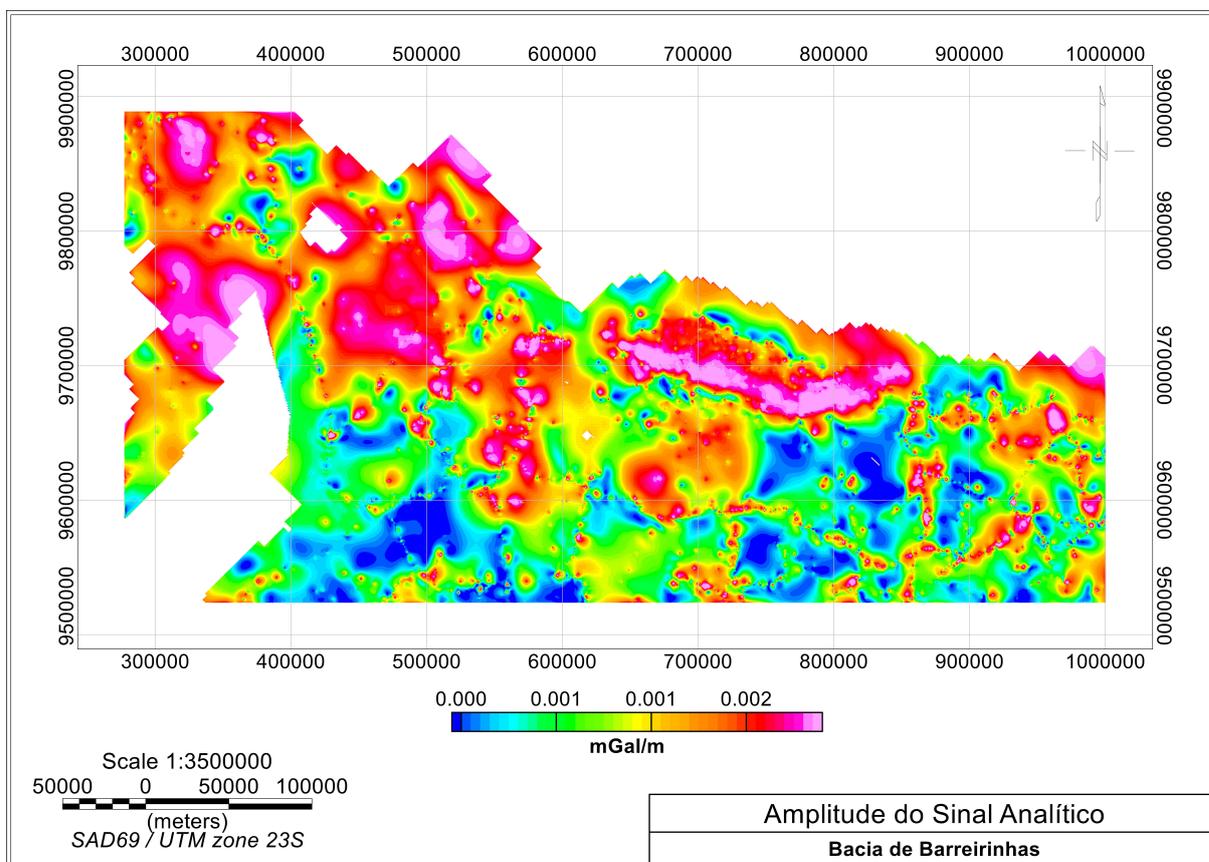


Figura 18 – Mapa da Inclinação do Sinal Analítico da região de estudo.

6 Conclusões

No presente trabalho foram realizados o processamento e a análise dos dados de campos potenciais da região da Bacia de Barreirinhas. A metodologia aplicada foi baseada na construção de mapas temáticos da Anomalia Bouguer, do Campo Magnético Anômalo e nas transformações lineares no domínio do número de ondas, das quais utilizamos a primeira derivada vertical, a amplitude do sinal analítico e a inclinação do sinal analítico.

A análise dos mapas permitiu a identificação da Plataforma de Sobradinho como sendo pertencente à transição *offshore/onshore* da Bacia de Barreirinhas. Observamos também os arcos estruturais que fazem parte da contexto tectono-estrutural da bacia, como o Alto de Tutóia que delimita as bacias de Barreirinhas e Ceará e a presença de grabens na região de grande ocorrência de falhas no limite entre a Bacia Pará-Maranhão. Com base nos mapas do campo magnético anômalo, primeira derivada e o ASA magnético esta região de falhas pôde ser interpretada como a Zona de Fratura Romanche. A partir dos mapas do processamento gravimétrico foi possível indicar o depocentro da bacia coincidente com a região do Cráton São Luís.

Um aspecto limitante do trabalho desenvolvido consiste na diferença de localização dos bancos de dados de gravidade e magnetismo. Estes estão pouco sobrepostos, fato que ocasionou uma análise pouco comparativa. O banco de dados de gravidade está localizado majoritariamente na parte *onshore* da bacia, com uma pequena parcela contida na transição para o oceano. Já o banco de dados magnéticos está localizado na porção *offshore*, com uma pequena parcela na transição para o oceano.

Outro fator de entrave neste trabalho consiste na pouca relevância da inclinação do sinal analítico (ISA), para ambos os dados. Isso pode estar associado a não alteração do mapa ISA em relação ao mapa da primeira derivada vertical. Sendo assim, não foi possível ter um aproveitamento deste processamento.

Como perspectivas, pode-se buscar um melhor adensamento espacial dos dados magnéticos através de expedições de campo na região, o que permitiria uma significativa sobreposição em relação ao banco de dados de gravidade. A aplicação de outras técnicas de realce, como a filtragem passa-banda (i.e., *Butterworth*) e ainda técnicas para a determinação das profundidades de fontes-alvo, como a deconvolução de Euler, seria interessante para complementar o estudo. Adicionalmente, a integração com outros dados multigeofísicos, como linhas sísmicas e perfis geofísicos de poços, traria um aumento do conhecimento em relação às possibilidades exploratórias da bacia.

Referências

- ALLEN, P. A.; ALLEN, J. R. *Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- ANTOBREH, A. et al. Rift–shear architecture and tectonic development of the ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data. *Marine and Petroleum Geology*, Elsevier, v. 26, n. 3, p. 345–368, 2009.
- ATTOH, K. et al. Seismic stratigraphic record of transpression and uplift on the romanche transform margin, offshore ghana. *Tectonophysics*, Elsevier, v. 378, n. 1-2, p. 1–16, 2004.
- AZEVEDO, R. d. Interpretação geodinâmica da evolução mesozóica da bacia de barreirinhas. *Congr. Bras. Geol.*, v. 3, p. 1115–1130, 1986.
- AZEVEDO, R. d. et al. Modelamento tectônico, origem e evolução da bacia de barreirinhas. *Simpósio de Geologia da Amazônia*, v. 2, p. 208–221, 1985.
- BLAKELY, R. J. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. [S.l.]: Cambridge university press, 1996.
- BRIGGS, I. C. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 39, n. 1, p. 39–48, 1974.
- CARGNELUTTI, J. et al. Fundamentos conceituais da determinação do geóide pelo método gravimétrico. Universidade Federal de Santa Maria, 2007.
- CONCEICAO, J. J.; ZALAN, P.; WOLFF, S. Mecanismo, evolução e cronologia do rift sul-atlântico. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 2, n. 2-4, p. 255–265, 1988.
- ESCOBAR, I. P. Forma e dimensões da terra. *Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Cartográfica*, 2000.
- FILHO, N. R.; MARTINS, C. M.; SANTOS, R. de S. A novel regional-residual separation approach for gravity data through crustal modeling. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 36, n. 4, p. 491–505, 2018.
- GEMAEL, C. Introdução à geodésia física. *Curitiba: Editora da UFPR*, v. 302, p. 2002, 1999.
- HOFMANN-WELLENHOF BERNHARD E MORITZ, H. Fundamentos da teoria do potencial. *Geodésia Física*, p. 3–41, 2005.
- ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. *Geological interpretation of aeromagnetic data*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration . . . , 2013.
- JASPER, A. Legislação para exploração (mineração) e venda de fósseis: caracterização da realidade brasileira. *GEONOMOS*, v. 2010, p. 5, 01 2010.
- JÚNIOR, A.; MAESTU, M. *Estudo tectonossedimentar da porção emersa da Bacia de Barreirinhas com base em dados geofísicos*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

- JÚNIOR, A. V. S.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. Evolução da margem atlântica equatorial do brasil: Três fases distensivas. *Geociências (São Paulo)*, v. 27, n. 4, p. 427–437, 2008.
- JÚNIOR, A. V. S. et al. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem atlântica equatorial do brasil: Triássico ao holoceno. *Geociências*, p. 669–692, 2011.
- JUNIOR, I. T. et al. Bacia de barreirinhas. *Bol. Geociências Petrobrás, Rio J.*, v. 15, n. 2, p. 357–369, 2007.
- LI, X.; GÖTZE, H.-J. Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 66, n. 6, p. 1660–1668, 2001.
- LOPES, J. A.; CASTRO, D. L. de; BERTOTTI, G. Quantitative analysis of the tectonic subsidence in the potiguar basin (ne brazil). *Journal of Geodynamics*, Elsevier, v. 117, p. 60–74, 2018.
- MILANI, E. J. et al. Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas. *Anexo ao Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, n. 1, p. 183–205, 2007.
- MILLER, H. G.; SINGH, V. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, Elsevier, v. 32, n. 2-3, p. 213–217, 1994.
- MOHRIAK, W.; ROSENDAHL, B. Transform zones in the south atlantic rifted continental margins. *Geological Society, London, Special Publications*, Geological Society of London, v. 210, n. 1, p. 211–228, 2003.
- MONTENEGRO, C. et al. The barreirinhas basin internal architecture and the evidence of transform movements along the romanche fracture zone, brazilian equatorial margin. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, p. 103049, 2020.
- PAMPLONA, H. Litoestratigrafia da bacia cretacea de barreirinhas. *Boletim tec. da Petrobras*, v. 12, p. 261–290, 1969.
- REYNOLDS, J. M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-d analytic signal. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 57, n. 1, p. 116–125, 1992.
- SIEMON, B. et al. Airborne electromagnetic, magnetic, and radiometric surveys at the german north sea coast applied to groundwater and soil investigations. *Remote Sensing, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 12, n. 10, p. 1629, 2020.
- SOARES, E. F. et al. Bacia do pará-maranhão. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 321–330, 2007.
- SZATMARI, P. et al. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. *Revista brasileira de Geociências*, v. 17, n. 2, p. 180–188, 2018.
- TAVARES, A. C. *Evolução da zona de fratura romanche na margem equatorial do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2017.
- TELFORD, W. M. et al. *Applied geophysics*. [S.l.]: Cambridge university press, 1990.

TORGE, W.; MÜLLER, J. *Geodesy*. [S.l.]: Walter de Gruyter, 2012.

VERDUZCO, B. et al. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The leading edge*, Society of Exploration Geophysicists, v. 23, n. 2, p. 116–119, 2004.

WATTS, A. B. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2001.

WIKIPÉDIA, a. e. l. *P*. 2020. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Pirrotite>>.

WIKIPÉDIA, a. e. l. *Magnetita*. 2021. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Magnetita>>.

WILLIAM, L. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge University Press, 2007.

WOODCOCK, N. H.; FISCHER, M. Strike-slip duplexes. *Journal of structural geology*, Elsevier, v. 8, n. 7, p. 725–735, 1986.

ZALÁN, P. V. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 595–613, 2004.