



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

JONATHAN SANTOS MATTOS

ANÁLISE DE FEIÇÕES ESTRUTURAIS E DISTRIBUIÇÃO ÍGNEA NA REGIÃO LESTE
DA BACIA DO PARNAÍBA UTILIZANDO DADOS AEROMAGNÉTICOS E POÇOS

Rio de Janeiro

2022

JONATHAN SANTOS MATTOS

ANÁLISE DE FEIÇÕES ESTRUTURAIS E DISTRIBUIÇÃO ÍGNEA NA REGIÃO LESTE
DA BACIA DO PARNAÍBA UTILIZANDO DADOS AEROMAGNÉTICOS E POÇOS

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,
apresentado como requisito necessário para
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Braga
Coorientador: Prof^a Dra. Renata da Silva Schmitt
Coorientador: Maria Filipa Perez da Gama
Coorientador: Dr. Alessandro Ferraz Palmeira

Rio de Janeiro

2022

M444a Mattos, Jonathan Santos
Análise de feições estruturais e distribuição ígnea na região leste da bacia do parnaíba utilizando dados aeromagnéticos e poços / Jonathan Santos Mattos. -- Rio de Janeiro, 2022.
73 f.

Orientador: Marco Antonio Braga.
Coorientador: Renata da Silva Schmitt.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Bacharel em Geologia, 2022.

1. Magnetometria. 2. Bacia do Parnaíba. 3. Basaltos. 4. Zonas de Cisalhamento. I. Braga, Marco Antonio, orient. II. Schmitt, Renata da Silva, coorient. III. Título.

JONATHAN SANTOS MATTOS

ANÁLISE DE FEIÇÕES ESTRUTURAIS E DISTRIBUIÇÃO ÍGNEA NA REGIÃO
LESTE DA BACIA DO PARNAÍBA ATRAVÉS DE FILTROS APLICADOS EM DADOS
AEROMAGNÉTICOS E POÇOS

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito necessário
para obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Rio de Janeiro, 23 de dezembro de 2022.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Braga – Membro Interno
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Dr. Patrick Fuhr Dal' Bó – Membro Interno
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Dr. Alan de Souza Cunha – Membro Interno (CPGA - UFRJ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por todas as bênçãos que recebi, enquanto trilhava meu caminho até o momento atual. A minha família e a minha namorada por todo suporte e amor oferecidos neste trajeto. Vocês estiveram comigo, literalmente, em todas as horas que mais precisei. Foram inúmeros altos e baixos, momentos de esperança e também de dúvidas. Meu amor por vocês é imensurável.

Aos meus amigos, dentro e fora da Geologia, que me ajudaram a aliviar as tensões quando necessário e que juntos vivenciamos histórias e aventuras que vão perdurar para sempre. Seja nas resenhas e festas do dia a dia, seja nas experiências, boas e ruins, que tivemos nos campos realizados em todos esses anos.

Ao Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA) e a todos que me acolheram e puderam contribuir com qualquer tipo de conhecimento. Especialmente aos meus orientadores: Maria Filipa Gama e Marco Antonio Braga.

Ao Centro Digital de Geoprocessamento Gondwana (CDGG), por todo suporte e conselhos na condução deste trabalho. Especialmente aos meus Coorientadores: Renata Schmitt e Alessandro Palmeira.

Ao Projeto Alagoas, um esforço colaborativo de pesquisa entre Shell Brasil Petróleo Ltda., ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e UFRJ, por meio do regulamento da taxa de P&D (Cooperação Técnica nº 20219-2), pela oportunidade de ter acesso aos dados científicos e trabalhar em conjunto com os pesquisadores deste projeto.

Ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, bem como a todos os professores e servidores, que auxiliaram e inspiraram a mim e aos meus colegas.

“A natureza está constantemente a misturar-se
com a arte”.

(Ralph Emerson)

RESUMO

A magnetometria é uma das ferramentas mais relevantes para a caracterização do arcabouço estrutural das bacias sedimentares, pois podem ser feitas inferências sobre as propriedades físicas e geometria das rochas subsuperficiais. Portanto, este trabalho busca aplicar filtros de realce nas anomalias de frequência características das rochas ígneas das formações Sardinha e Mosquito, assim como, as principais feições estruturais do arcabouço da Bacia do Parnaíba, uma bacia intracratônica, localizada na região nordeste do Brasil e que possui cerca de 600.000 km² de área (MOCITAIBA; DE CASTRO, 2015). Este trabalho faz parte do Projeto Alagoas, que possui o objetivo de estudar o Andar Alagoas nas bacias do Parnaíba e Araripe. A metodologia baseia-se na integração dos dados aeromagnéticos de vários projetos de domínio público cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), com o uso do *software* Oasis Montaj - SEEQUENT, utilizado também para aplicação das ferramentas de realce como Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Inclinação do Sinal Analítico (ISA) e Derivadas Verticais e Horizontais. Os resultados obtidos permitiram observar a continuidade das principais feições estruturais como a Faixa Gurupí e as zonas de cisalhamentos Transbrasiliano, Senador Pompeu, Patos, Pernambuco, Tauá, Tentugal, entre outras feições que compõem o embasamento da bacia. Com o comparação do mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e os dados de poços que interceptam as anomalias, foi possível inferir a extensão em subsuperfície dos derrames mais rasos dos basaltos das formações Sardinha e Mosquito.

Palavras-chave: Magnetometria; Bacia do Parnaíba; Basaltos; Zonas de Cisalhamento;

ABSTRACT

Magnetometry is one of the most relevant tools for characterizing the structural framework of sedimentary basins, as inferences can be made about the physical properties and geometry of subsurface rocks. Therefore, this work seeks to apply highlight filters to the data in order to highlight the characteristic frequency anomalies of the igneous rocks of the Sardinha and Mosquito formations, as well as the main structural features of the Parnaíba Basin framework, an intracratonic basin, located in the northeast region of Brazil, which have an area of about 600,000 km² (MOCITAIBA; DE CASTRO, 2015). This work is part of the Alagoas Project, which aims to study the Andar Alagoas in the Parnaíba and Araripe basins. The methodology is based on the integration of aeromagnetic data from several public domain projects provided by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) and by the Mineral Resources Research Company (CPRM), with the use of Oasis Montaj - SEEQUENT, software also used to apply enhancement tools such as Analytical Signal Amplitude (ASA), Analytical Signal Slope (ISA) and Vertical and Horizontal Derivatives. The results obtained allowed us to observe the continuity of the main structural features such as the Gurupí Belt and the Transbrasiliano, Senador Pompeu, Patos, Pernambuco, Tauá, Tentugal shear zones, among other features that make up the basement of the basin. By comparing the Analytical Signal Amplitude (ASA) map and the data from wells, which intercepts the anomalies, it was possible to infer the subsurface extent of the shallower flows of basalts from the Sardinha and Mosquito formations.

Keywords: Magnetometry; Parnaíba Basin; basalts; Shear Zones;

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-** Mapa de localização da Bacia do Parnaíba, em amarelo, com destaque para a área de estudo em vermelho.----- 12
- Figura 2-** Imagens (a–d) ilustrando um modelo geodinâmico conceitual da evolução tectônica da Bacia do Parnaíba. AM-Amazônia; SF-São Francisco; SL-São Luís; PR-Bloco Parnaíba; BB-Borborema; TO - Tocantins; GU - Gurupi. Grábens Neoproterozoicos-Eopaleozoicos (áreas hachuradas), grabens cambrianos (áreas cinzentas) e exposições vulcânicas (áreas pretas). As setas indicam tensões tectônicas. Fonte: (DE CASTRO et al., 2014).----- 15
- Figura 3-** Nomenclatura usual para os “terrenos” que compõem a Província Borborema. Fonte: (Brito Neves et al., 2000).----- 16
- Figura 4-** Gráfico de susceptibilidade magnética média em rochas específicas; Fonte: KEARY et al. (2009).-----19
- Figura 5-** Modelo de aeroplano e ferramentas utilizadas em um levantamento aeromagnético; Fonte: FENG et al. (2022).-----20
- Figura 6-** Representação das linhas predefinidas de um levantamento aerogeofísico; Fonte: RIBEIRO et al. (2014).-----21
- Figura 7-** Mapa dos levantamentos aerogeofísicos cedidos pelo Projeto Alagoas.-----23
- Figura 8-** Mapa de distribuição dos poços analisados dentro da área de interesse.-----24
- Figura 9-** Comparação dos resultados de filtragem TMI e ASA em diferentes profundidades. Fonte: Modificado (FERREIRA, 2010).-----26
- Figura 10-** Comparação dos resultados de filtragem TMI e ISA em diferentes profundidades. Fonte: Modificado (FERREIRA, 2010).-----27

Tabela 1 - Recorte da tabela do cálculo de valor agregado a cada poço.-----	28
Figura 11 - Mapa do campo magnético total (TMI).-----	29
Figura 12 - Seção sísmica de profundidade de um seção E -W da Bacia do Parnaíba. Fonte: (DALY et al., 2014). -----	30
Figura 13 - Mapas da amplitude do sinal analítico (ASA) original e após técnica Matched Filtering. (A) - ASA original; (B) - ASA 20-10 km; (C) - ASA 10-4 km; (D) - ASA 4-2 km; (E) ASA 2 km - topo.-----	31
Figura 14 - Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) com sombreamento a 135°.-----	32
Figura 15 - Mapa da derivada horizontal longitudinal (GX).-----	33
Figura 16 - Mapa ASA com interpretação dos diques mapeados.-----	34
Figura 17 - Mapas ISA com e sem interpretação das principais zonas de cisalhamento da Província Borborema. (ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;.-----	35
Figura 18 - Mapa ISA com interpretação dos lineamentos estruturais da área de estudo.-----	36
Figura 19 - Mapa GX com interpretações de lineamentos rúpteis NE-SW.-----	38
Figura 20 - Mapa GX com interpretações de lineamentos rúpteis NW-SE.-----	39
Figura 21 - Mapa de domínios magnéticos. -----	40

Figura 22- Mapa da krigagem de espessura com distribuição dos poços analisados.-----	42
Figura 23- Mapa da krigagem da profundidade na 1º aparição ígnea, com distribuição dos poços analisados.-----	43
Figura 24- (A) - Sombreamento dos mapas ASA rasos; (B) - Sombreamento dos mapas ASA rasos com interpretação da extensão de ígneas rasas em subsuperfície.-----	45
Figura 25- (A) - Mapa ASA 4-2 km com poços de espessura ígnea superior a 400 m; (B) - Mapa krigagem de espessura com poços de espessura ígnea superior a 400 m. -----	46
Figura 26- (A) - Mapa ASA 4-2 km com poços com valores agregados; (B) - Mapa ASA 4-2 km com poços com valores agregados e interpretação da extensão de ígneas rasas em subsuperfície; (C) - Mapa de Krigagem de profundidade de 1º aparição ígnea, com poços com valores agregados e interpretação do contraste de profundidade; (D) - Mapa dos poços com valores agregados, interpretação da extensão de ígneas rasas em subsuperfície e interpretação do contraste de profundidade.-----	47
Figura 27- Mapa de distribuição de ígneas rasas em subsuperfície, adicionada a Formação Sardinha aflorante, mapeada pela CPRM. -----	49
Figura 28- Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) com a localização das suítes intrusivas proterozoicas no Cráton São Luís e das formações Mosquito e Sardinha na Bacia do Parnaíba. Fonte: (MOCITAIBA et al., 2017). -----	50
Figura 29- Mapa de interpretação das feições estruturais da Província Borborema divididas nos domínios geotectônicos. Ao fundo o sombreamento do mapa ISA. (ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;-----	52
Figura 30- Mapa de interpretação das feições estruturais da Província Borborema divididas nos domínios geotectônicos por debaixo da Bacia do Parnaíba. Ao fundo o sombreamento do mapa ISA. (ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;-----	53

Figura 31: Mapa geológico, em inglês, interpretado da Província Borborema. As abreviações correspondem aos nomes das zonas de cisalhamento. SP - Senador Pompeu; PT - Patos shear zone; PE - Pernambuco; BV - Boa Vista; C - Cinturão Cachoeirinha; S - Cinturão Seridó;. Fonte: (GANADE et al., 2021) – Figura em Inglês. -----54

Figura 32: (a) - Proposta de mapa paleotectônico do embasamento pré-siluriano da Bacia do Parnaíba e áreas adjacentes; (b) - Mapa de suporte com as principais características observadas em a compilação de dados aqui apresentada, incluindo a localização dos depocentros backstripped de Ipu (Ordoviciano tardio a Siluriano) e Sambaíba (Triássico) formações da Bacia do Parnaíba. Fonte: (PORTO et al., 2022) – Figura em Inglês. -----55

Figura 33: Mapa TMI com interpretação dos terrenos crustais a oeste do Transbrasiliano e domínios contínuos da Província Borborema por debaixo da Bacia do Parnaíba. (ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;. -----56

Figura 34: Rosetas dos lineamentos de cada domínio interpretado. -----58

Figura 35: Mapa da interpretação das feições estruturais e seus domínios.(ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;. -----59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASA - Amplitude do Sinal Analítico

CDGG - Centro Digital de Geoprocessamento Gondwana

CPGA - Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

ENE - Leste-Nordeste

E-W - Leste-Oeste

GX - Gradiente Horizontal Longitudinal

ISA - Inclinação do Sinal Analítico

K - Susceptibilidade Magnética

Ma - Milhões de Anos

NE - Nordeste

nT - Nanotesla

NW - Noroeste

S - Sul

SE - Sudeste

SW - Sudoeste

T - Tesla

TMI - Campo Magnético Total

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

WSW - Oeste-Sudoeste

ZCG - Zona de Cisalhamento Granja

ZCPA - Zona de Cisalhamento Patos

ZCPE - Zona de Cisalhamento Pernambuco

ZCSP - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu

ZCTB - Zona de Cisalhamento Transbrasiliiano

ZCTG - Zona de Cisalhamento Tentugal

ZCTJ - Zona de Cisalhamento Tatajuba

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Apresentação e Objetivo	11
1.2. Localização	12
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	13
2.1. Bacia do Parnaíba	13
2.2. Província Borborema	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1. Conceitos Básicos	18
3.1.1. Campo Magnético	18
3.1.2. Susceptibilidade Magnética e Magnetização das Rochas	19
3.2. Magnetometria	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Materiais	22
4.1.1. Dados Utilizados	22
4.1.1.1. Dados Aeromagnetométricos	22
4.1.1.2. Poços	23
4.1.1.3. Mapas Geológicos	25
4.1.2. Softwares Utilizados	25
4.2. Métodos	25
4.2.1. Filtros e Métodos de Realce	25
4.2.1.1. Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	25
4.2.1.2. Inclinação do Sinal Analítico (ISA)	26
4.2.1.3. Derivada Horizontal Longitudinal (GX)	27
4.2.1.4. Filtragem de Poços a partir de Valor Agregado	27
4.2.2. Ferramentas de Krigagem	28
5. RESULTADOS	29
5.1. Mapas Magnéticos e Ferramentas de Realce	29
5.1.1. Mapa Campo Magnético Total (TMI)	29
5.1.2. Mapa Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	30
5.1.3. Mapa Inclinação do Sinal Analítico (ISA)	32
5.1.4. Mapa Derivada Horizontal Longitudinal (GX)	33
5.2. Interpretações	34
5.2.1. Diques Máficos	34
5.2.2. Feições Estruturais Dúcteis	35
5.2.3. Feições Estruturais Rúpteis	37
5.3. Domínios Magnéticos	40
5.4. Ferramentas de Krigagem	42

5.4.1. Krigagem da Espessura	42
5.4.2. Krigagem da Profundidade	43
6. DISCUSSÕES	44
6.1. Poços Analisados e Rochas Ígneas	44
6.2. Lineamentos Estruturais	51
7. CONCLUSÕES	60
8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS	62

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO E OBJETIVO

Os estudos da formação e evolução das bacias sedimentares dentro do país e ao redor do mundo são realizados por meio de análises geológicas estruturais que permitem vincular e comparar dados para compreender e reconstruir suas origens. Essas estruturas influenciam a sedimentação geral e a preservação das bacias. A Bacia do Parnaíba é uma sinéclise intracratônica e circular, com aproximadamente 3.500 m de espessura em seu depocentro (VAZ *et al.*, 2007). Sua formação é de origem Cambro-Ordoviciano e sua evolução por subsidência flexural permitiu um preenchimento que decorreu entre o Siluriano e o Cretáceo, com intrusões ígneas de idade jurássica e cretácea.

Existem inúmeros trabalhos envolvendo a Bacia do Parnaíba e a porção oeste da Província Borborema. As principais zonas de cisalhamento da Borborema já foram mapeadas e identificadas em diversos estudos desde a década de 1980 até os últimos anos (SZATMARI *et al.*, 1987) (OLIVEIRA; MEDEIROS, 2018). Assim como mapas magnéticos localizando as rochas ígneas presentes na bacia através de suas anomalias (DE CASTRO; OLIVEIRA; HOLLANDA, 2018). Recentemente, PORTO *et al.* (2022) elaboraram um mapa do arcabouço estrutural sob as camadas sedimentares da bacia, onde foram identificados diferentes domínios crustais.

Entretanto, nota-se uma escassez do conhecimento estrutural na área de interesse. Principalmente no que se refere a continuação das principais zonas de cisalhamento da Província Borborema no embasamento da Bacia do Parnaíba. Tal como a inconsistência nos dados de distribuição em subsuperfície e profundidade dos corpos ígneos das formações Sardinha e Mosquito.

O objetivo deste trabalho é aplicar filtros aos dados magnéticos para destacar as anomalias dos corpos intrusivos das formações ígneas, assim como as principais características estruturais do embasamento da Bacia do Parnaíba e das rochas aflorantes da região oeste da Província Borborema.

Por ser não invasiva e relativamente mais barata que a maioria dos outros métodos de exploração, a aerogeofísica é uma ferramenta muito utilizada para pesquisas e análises estruturais em áreas de grande extensão (ZACCHI, 2011). A magnetometria é um método de

investigação geofísica que tem como objetivo investigar a geologia com base nas anomalias do campo magnético terrestre e das propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície. O magnetismo é uma propriedade que tem origem na estrutura atômica dos minerais e ela define como o material irá se comportar na presença de um outro campo magnético. O magnetômetro mede a intensidade magnética total do campo (TMI), que é o vetor soma das componentes verticais e horizontais (KEAREY *et al.*, 2009).

1.2. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo fica localizada na Região Nordeste do Brasil entre as latitudes 02° 25 'S e 09° 03' S e as longitudes 39° 30' W e 44° 50' W (Figura 1). Situa-se majoritariamente no estado do Piauí, mas compreende também o oeste do Maranhão, leste do Ceará e parte de Pernambuco e Bahia.

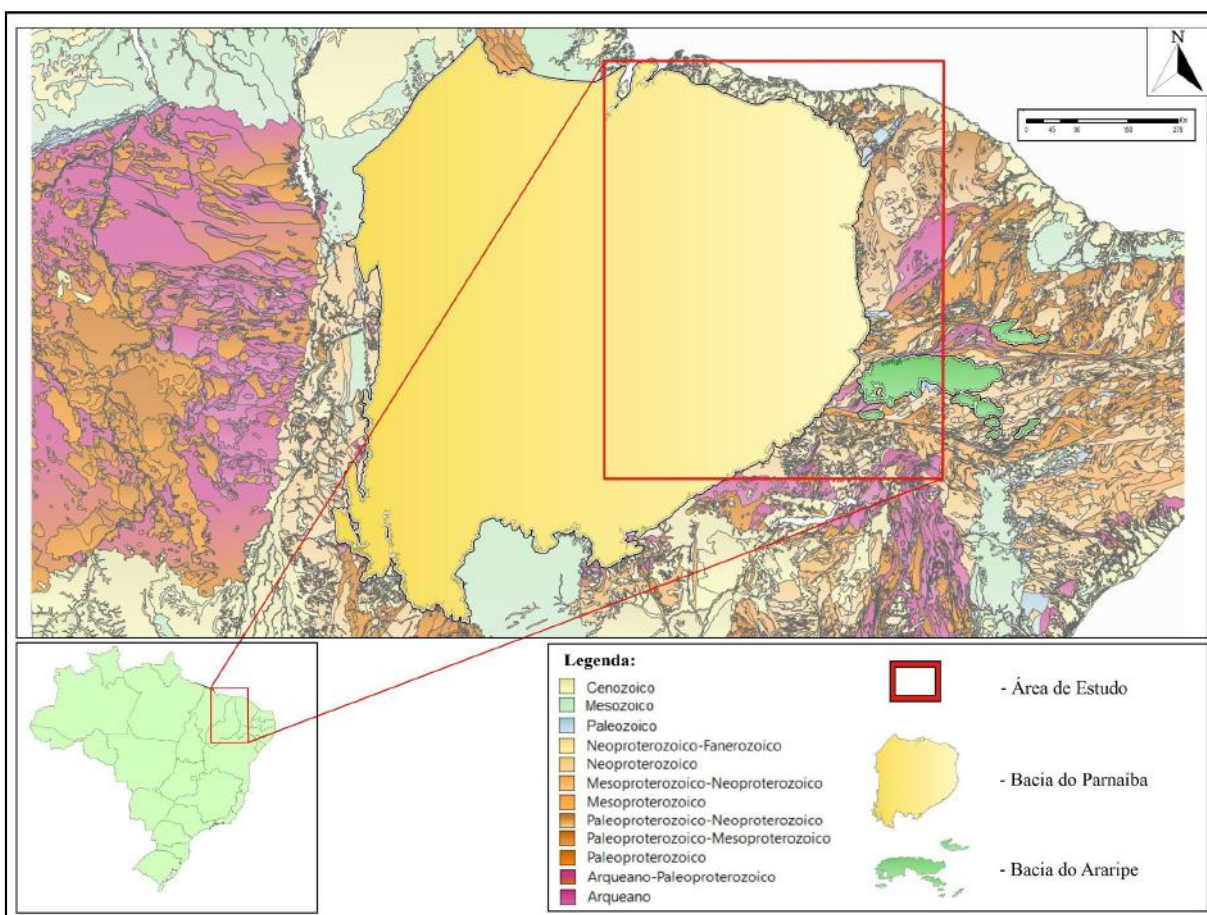


Figura 1: Mapa de localização da Bacia do Parnaíba, em amarelo, com destaque para a área de estudo em vermelho.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1. BACIA DO PARNAÍBA

Segundo ZALÁN (2004), existem quatro principais etapas ou ciclos nas formações das bacias brasileiras. A primeira etapa, de idade pré-cambriana, conhecida como Ciclo Brasileiro, serviu, a partir da consolidação e colagem de antigas plataformas, como substrato para a evolução fanerozoica. Este ciclo foi atuante durante o Neoproterozoico ao Cambriano e levou à formação do Supercontinente Gondwana. A segunda etapa, de idade cambro-ordoviciana, viu um declínio nos processos dúcteis e aumento nos rúpteis, como os falhamentos que geraram os desníveis formadores das bacias sedimentares brasileiras. A terceira etapa, de idade siluro-jurássica, é conhecida por sua tectônica estável e, por isso, favoreceu o acúmulo e preservação dos sedimentos. A última fase, de idade jurássica, é caracterizada pelo ressurgimento da intensa atividade tectônica e magmática que levaram ao rompimento do Gondwana e à abertura do Oceano Atlântico.

A Bacia do Parnaíba está localizada no nordeste brasileiro, cercada ao leste pela Província Borborema, ao oeste pela Bacia do Amazonas e a Faixa Araguaia, ao norte pelo Cráton São Luís e ao sul-sudeste pelo Cráton São Francisco. Sua formação ocorre no segundo ciclo citado acima, de idade cambro-ordoviciana. A preservação de sedimentos se deu desde o início de sua origem, com a Formação Jaibaras, e terminou no Cretáceo com a Formação Itapecuru. A bacia também apresentou intrusões ígneas de idade jurássica e cretácea, denominadas formações Mosquito e Sardinha, respectivamente.

É uma bacia intracratônica acomodada sobre um embasamento cristalino originado e altamente retrabalhado no Ciclo Brasileiro (CORDANI *et al.*, 1984). CORDANI *et al.* (1984) e BRITO NEVES *et al.* (1984) defendem a existência de um bloco cratônico central, conhecido por "Bloco Parnaíba". Segundo CORDANI *et al.* (2009), no conhecimento tectônico moderno, estes maciços crustais rígidos seriam produtos da fissão do Supercontinente Rodínia, ocorrida há cerca de 900 Ma, anteriormente à formação das faixas de dobramento brasileiras. No processo de amalgamação do Supercontinente Gondwana, esses fragmentos cratônicos antigos foram circundados por faixas móveis do Neoproterozoico, como é o caso da Faixa Gurupí, localizada ao sul do Cráton de São Luís, e dos segmentos setentrional, central e meridional da Província Borborema. No entanto, DE

CASTRO *et al.* (2014), introduzem modelos representativos da fragmentação, baseados em dados magnéticos e gravimétricos, desse bloco crustal central durante o Ciclo Brasileiro (Figura 2).

A norte da bacia, podemos observar a Faixa Gurupí e a Zona de Cisalhamento Tentugal (ZCTG). A primeira, caracteriza-se por ser uma faixa proterozoica formada na amalgamação entre os crátons São Luís, Amazonas e o "Bloco Parnaíba" (KLEIN *et al.*, 2005). Já o segundo é a zona de cisalhamento que separa a Faixa Gurupí do Cráton São Luís (YAMAGUTI *et al.*, 2000).

Cortando diagonalmente a bacia, nós temos a forte presença da Zona de Cisalhamento Transbrasileiro (ZCTB). Segundo CORDANI & SATO (1999), ela é definida como uma megaestrutura que influenciou fortemente a formação da plataforma brasileira, dando 5.000 km de extensão, dos quais 2.700 km em terras brasileiras, ao longo de diversas falhas e corpos ígneos, além da junção das duas massas continentais, o Cráton da Amazônica e o Cráton do São Francisco, o que não permitiu a individualização dessa última área em um novo continente.

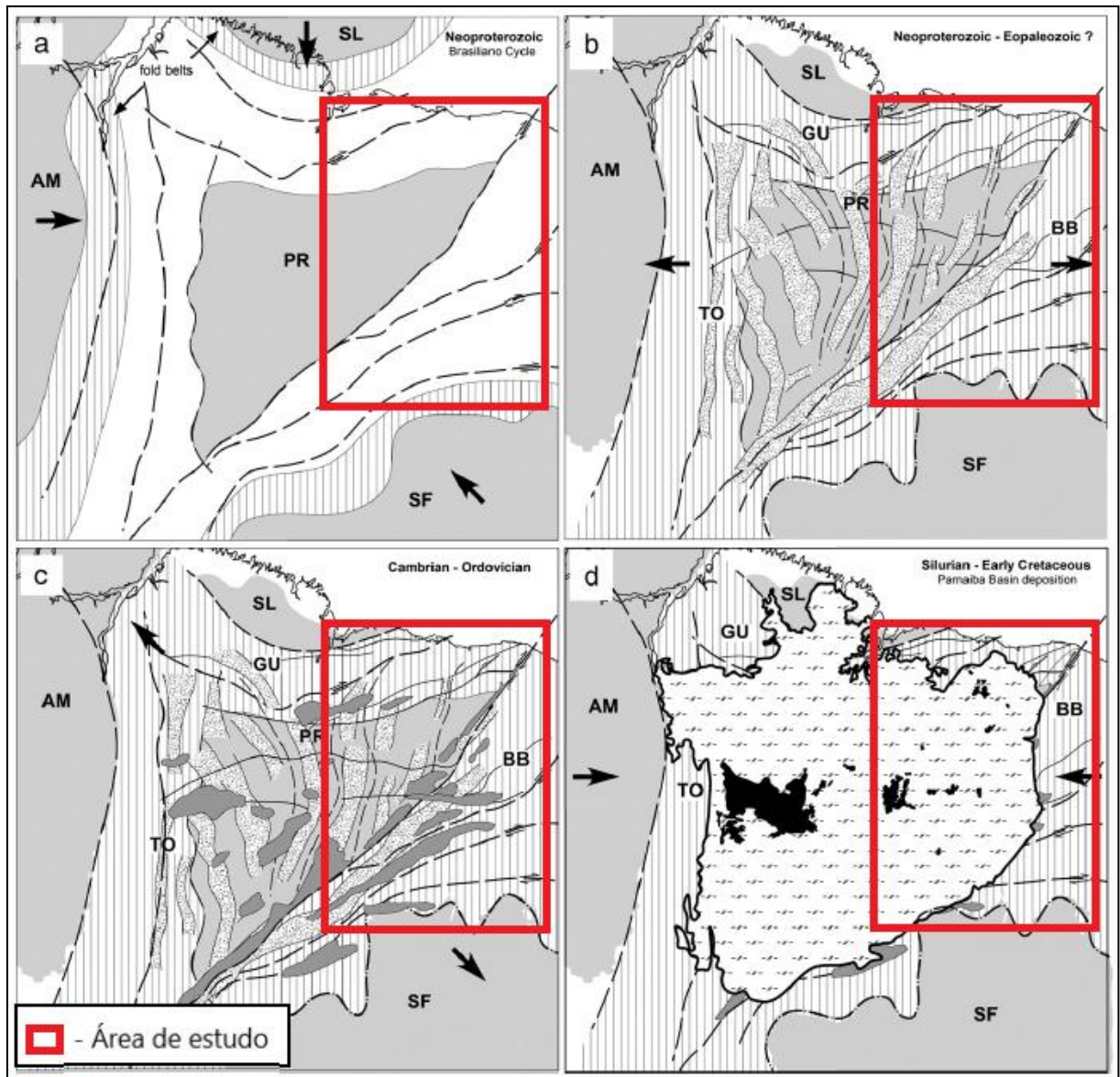


Figura 2: Imagens (a–d) ilustrando um modelo geodinâmico conceitual da evolução tectônica da Bacia do Parnaíba. AM-Amazônia; SF-São Francisco; SL-São Luís; PR-Bloco Parnaíba; BB-Borborema; TO - Tocantins; GU - Gurupi. Grábens Neoproterozoicos-Eopaleozoicos (áreas hachuradas), grabens cambrianos (áreas cinzentas) e exposições vulcânicas (áreas pretas). As setas indicam tensões tectônicas. Fonte: (Modificado: DE CASTRO et al., 2014) – Figura em Inglês.

2.2. PROVÍNCIA BORBOREMA

Com uma área superior a 380.000 km², a Província Borborema é um domínio geológico localizado no Nordeste Oriental do Brasil, limitado pelo Cráton São Francisco a sul, pela Bacia do Parnaíba a oeste e a norte e leste pelas bacias sedimentares da margem costeira (ALMEIDA *et al.*, 1977).

É constituída por unidades de rochas metamórficas, de diversas idades entre o Arqueano e o Proterozoico, que se truncam através de zonas de cisalhamentos regionais. Segundo BRITO NEVES *et al.* (2000), estas rochas se desenvolveram, principalmente, nos ciclos orogênicos Cariris Velhos (Meso-Neoproterozoico) e Brasileiro (final do Neoproterozoico), e se associaram com rochas mais antigas (Arqueano-Paleoproterozoico), que fizeram parte do Ciclo Transamazônico.

O esboço da divisão geotectônica da Província Borborema foi alvo de muita discussão, principalmente na década de 1980, entre BRITO NEVES (1983) e JARDIM DE SÁ (1984). Até que, BRITO NEVES *et al.* (2000) subdividiram a província em cinco domínios principais: Médio Coreau, Ceará Central, Rio Grande do Norte, Transversal e Sul (Figura 3).

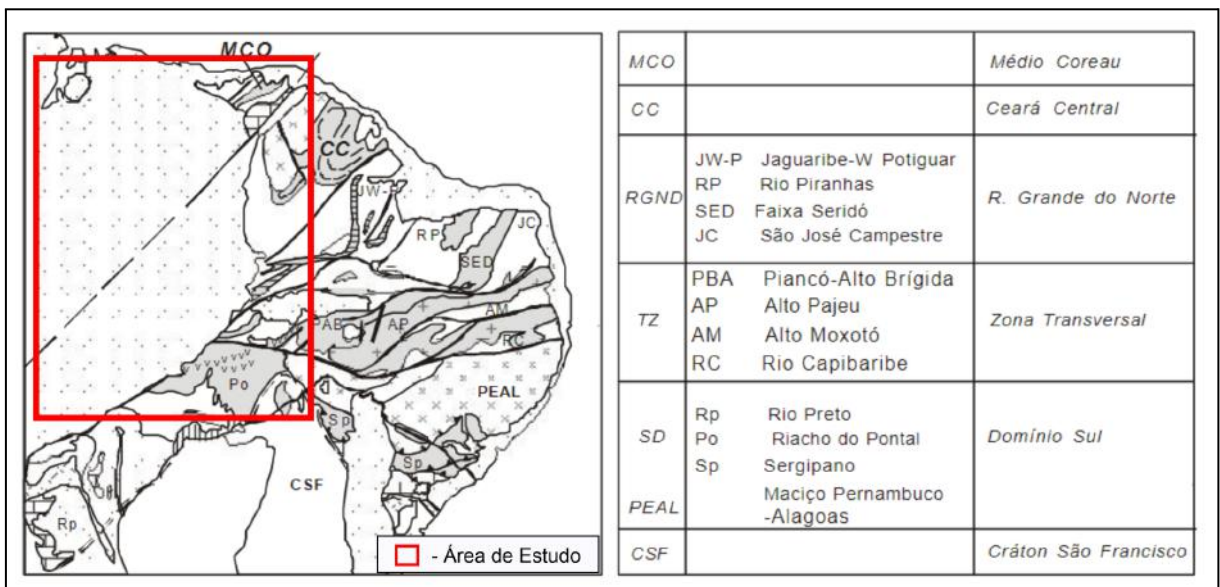


Figura 3: Nomenclatura usual para os “terrenos” que compõem a Província Borborema. Fonte: (Modificado: Brito Neves *et al.*, 2000).

Na região oeste da província, podemos encontrar os Diques Rio Ceará-Mirim. Segundo MOCITAIBA *et al.* (2017), a atividade ígnea da Formação Sardinha está inserida tectonicamente no conjunto de eventos eocretácicos, onde se incluem os derrames continentais da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná e o Enxame de Diques Rio Ceará-Mirim na Província Borborema, ambos ligados aos processos de quebra da litosfera que culminaram com a abertura do Atlântico Sul.

Também é na Província Borborema onde encontramos as principais zonas de cisalhamento abordadas neste estudo. A Zona de Cisalhamento Pernambuco foi descrita inicialmente como sendo uma zona de cisalhamento contínua por EBERT & CLARO (1970) e BRITO NEVES *et al.* (1984), com uma extensão de aproximadamente 600 km, começando na planície costeira do Recife e chegando até a Bacia do Parnaíba. De acordo com VAUCHEZ & EGÍDIO SILVA (1992), VAUCHEZ *et al.* (1995) e NEVES & MARIANO (1999), esta zona é composta de dois segmentos distintos: as zonas de cisalhamentos Pernambuco Leste e Pernambuco Oeste. Esta zona de cisalhamento, assim como outras, como, Tauá (ZCTA) Senador Pompeu (ZCSP), Tatajuba (ZCTJ) e Patos (ZCPA), foram caracterizadas como uma rede de falhas transcorrentes desenvolvidas durante a atuação da orogênese brasileira. As zonas de cisalhamento são marcadas caracteristicamente por rochas miloníticas, que variam entre os tipos milonito e protomilonito de alta a baixa temperatura (VAUCHEZ *et al.*, 1995).

Segundo GAMA JÚNIOR *et al.* (1992), a idade de 2.4 Ga obtida em gnaisses do Complexo Granja (Domínio Médio Coreaú) sugere que a formação da Zona de Cisalhamento Granja (ZCG) data do final do Arqueano, quando rochas da crosta inferior ascenderam através de um sistema oblíquo, durante o movimento do Bloco Ceará para WSW, cavalgando por cima do Bloco São Luís.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. CONCEITOS BÁSICOS

3.1.1. CAMPO MAGNÉTICO

Os campos magnéticos podem ser produzidos de duas formas. A primeira forma é usando partículas eletricamente carregadas em movimento, como os elétrons responsáveis pela corrente elétrica em um fio, para fabricar um eletroímã. A outra forma de produzir um campo magnético é usar partículas elementares, como os elétrons, que possuem um campo magnético intrínseco. Em alguns materiais, os campos magnéticos dos elétrons se somam para produzir um campo magnético no espaço que cerca o material. É por isso que um ímã permanente possui um campo magnético permanente. Na maioria dos materiais, por outro lado, os campos magnéticos dos elétrons se cancelam e o campo magnético em torno do material é nulo. Todos os campos magnéticos têm direção e força, então eles podem ser tratados como vetores. A unidade de densidade de fluxo magnético é chamada Tesla e é representada pela letra (T) no Sistema Internacional de Unidades. O campo geomagnético é expresso com o submúltiplo nanotesla (nT), que vale 10^{-9} Tesla. (HALLIDAY *et al.*, 2009).

O campo magnético terrestre pode ser dividido em três grupos, Campo Interno, Campo Externo e Campo Crustal. O externo é formado pela interação da atividade solar com a ionosfera terrestre. Todavia, este representa menos de 1% do campo magnético terrestre, mas pode variar de acordo com as tempestades solares e outros eventos. O principal campo gerador do magnetismo é o interno. Atualmente, estima-se que o núcleo da Terra é constituído basicamente de ferro e níquel e de 10% a 20% de elementos leves (como enxofre ou oxigênio). O constante movimento deste fluido gera correntes elétricas, e conseqüentemente, um campo magnético interno nos moldes da primeira forma explicada no parágrafo anterior. Já o Campo Crustal, representa a segunda forma de criar um campo magnético, que é o magnetismo permanente encontrado em rochas e minerais na crosta (HARTMANN, 2010).

É importante salientar sobre o Ponto de Curie, que é a temperatura em que as rochas, ao receberem mais calor, perdem seu magnetismo permanente. De acordo com DANTAS (2015), a superfície média de Curie na Bacia do Parnaíba fica a cerca de 20 km de

profundidade. Ou seja, abaixo dessa superfície, as rochas perdem o magnetismo, registrado em seus elétrons, da época em que foram formadas.

3.1.2. SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA E MAGNETIZAÇÃO DAS ROCHAS

A susceptibilidade magnética (K) é uma propriedade física que permite a magnetização da rocha, um processo chamado de indução magnética (ISLES & RANKIN, 2013). Segundo KEARY *et al.* (2009), as rochas são magnetizadas de acordo com sua susceptibilidade magnética. Rochas básicas tendem a ser mais magnetizadas por conta da alta proporção de minerais magnéticos, como a magnetita. Rochas ácidas geralmente possuem menor teor desses minerais em sua composição química. Por consequência, elas tendem a magnetizar em menor intensidade. Rochas sedimentares apresentam baixo magnetismo e as metamórficas possuem um comportamento magnético variado (Figura 4). As rochas ígneas das formações Sardinha e Mosquito possuem caráter básico (MOCITAIBA *et al.*, 2017)

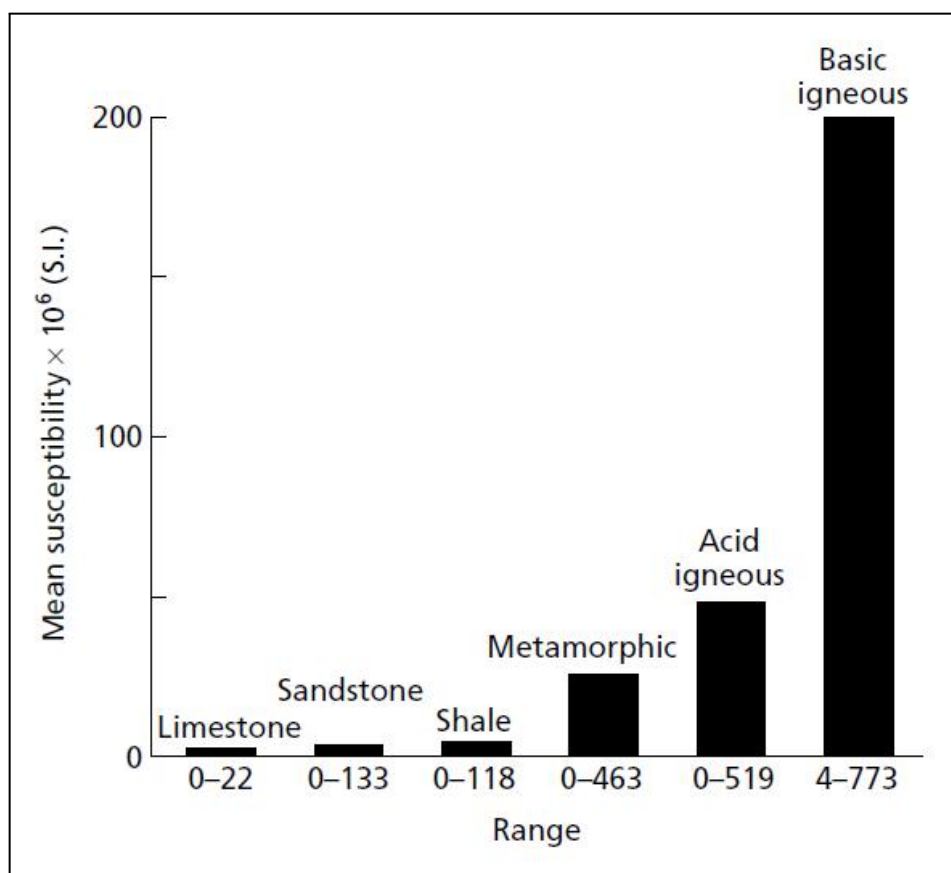


Figura 4: Gráfico de susceptibilidade magnética média em rochas específicas; Fonte: KEARY *et al.* (2009).

3.2. MAGNETOMETRIA

A magnetometria mede as variações na força do campo magnético da Terra. A grandeza medida por este método é a intensidade magnética total expressa em nanotesla (nT). A informação de interesse é o campo magnético associado à magnetização da rocha, que está diretamente relacionada à suscetibilidade magnética (DENTITH & MUDGE, 2014).

A aeromagnetometria foi a metodologia de aquisição de dados que originou os dados utilizados neste trabalho. Um levantamento aéreo usa uma aeronave equipada com magnetômetros e outros sensores montados na aeronave ou em um tubo, conhecido como *spike* ou *stinger*, preso à cauda da aeronave para evitar que ruídos gerados na aeronave interfiram nos dados (Figura 5). A coleta de dados ocorre ao longo de uma rota pré-determinada, as chamadas linhas de voo, que abrangem a área de interesse, e também linhas de controle, que geralmente são linhas de voo mais espaçadas e perpendiculares às outras (Figura 6). A navegação do avião é controlada por GPS, cujos dados são armazenados em conjunto com os dados de outros sensores.

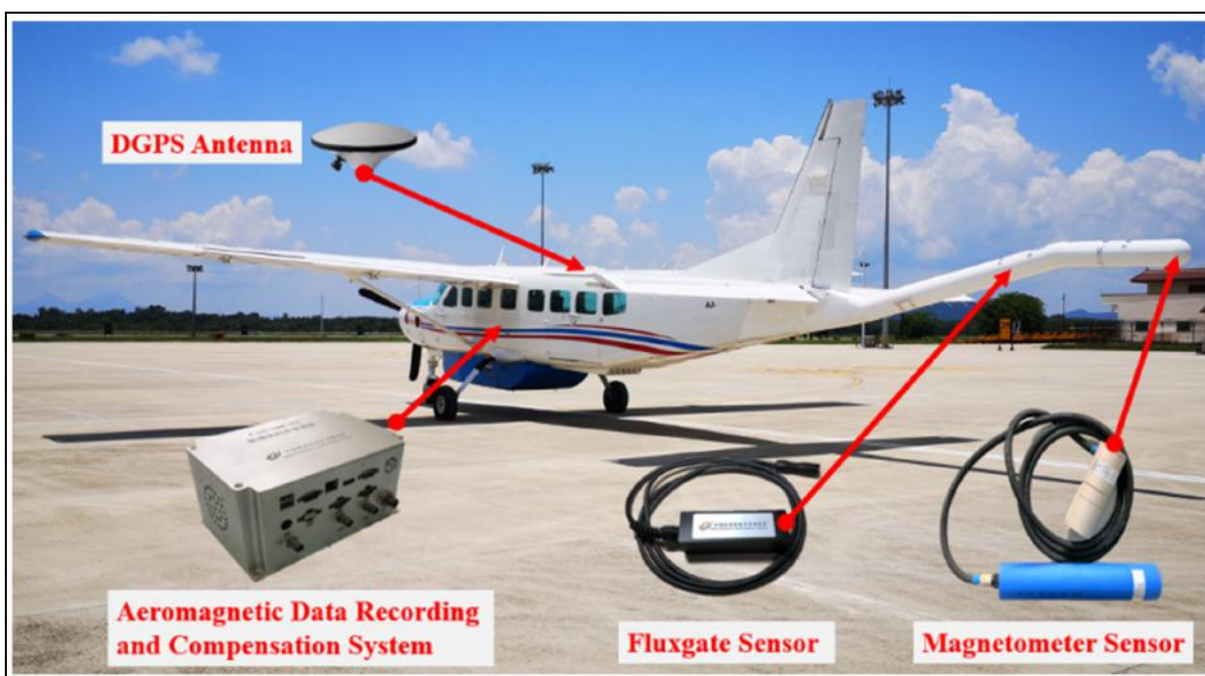


Figura 5: Modelo de aeroplano e ferramentas utilizadas em um levantamento aeromagnético; Fonte: FENG et al. (2022).

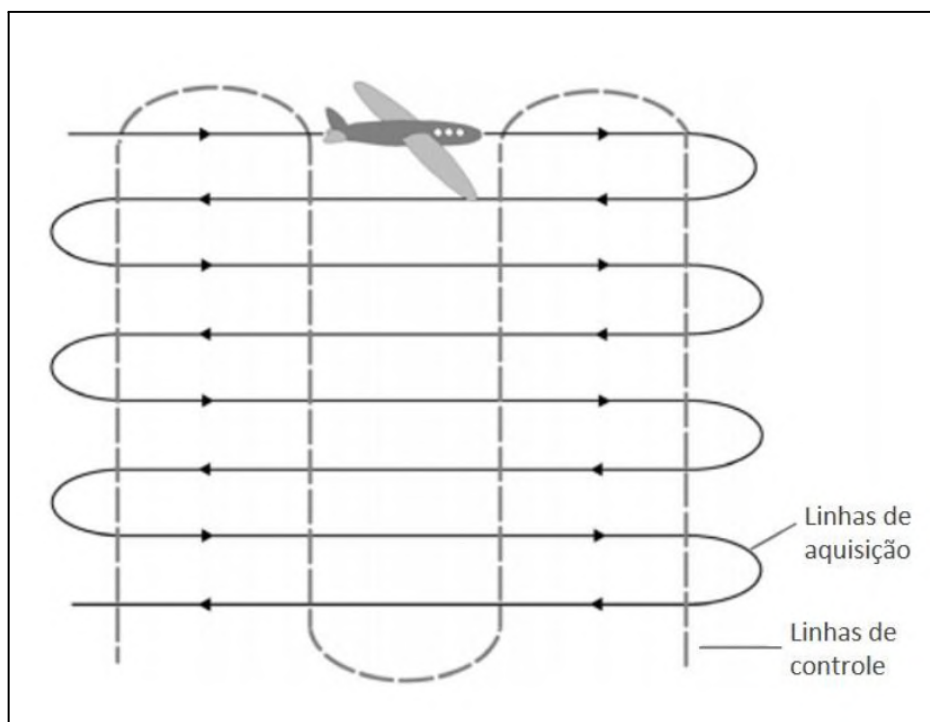


Figura 6: Representação das linhas predefinidas de um levantamento aerogeofísico; Fonte: RIBEIRO et al. (2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

4.1.1. DADOS UTILIZADOS

4.1.1.1. DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS

Os dados aeromagnetométricos utilizados neste trabalho foram cedidos pelo Projeto Alagoas, através do Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA). Como a área de estudo não possui um levantamento aerogeofísico único, foi preciso que o Laboratório CPGA realizasse a integração dos dados existentes a fim de recobrir toda a região. Portanto, foi executado o reprocessamento de quatorze levantamentos aéreos produzidos pela ANP e CPRM. Os dados de cada levantamento encontram-se no anexo deste documento.

Os procedimentos realizados para integração das aquisições aéreas foram a montagem do banco de dados e verificação das linhas de voo, a verificação dos canais gravados e o reprocessamento de nivelamento dos diferentes levantamentos aéreos. Por se tratar de aquisições de datas muito distintas, há diferenças de resolução, que ocasionaram pequenos contrastes nos contatos entre os diferentes levantamentos (Figura 7). No entanto, estes contrastes e ruídos não restringiram a execução deste projeto.

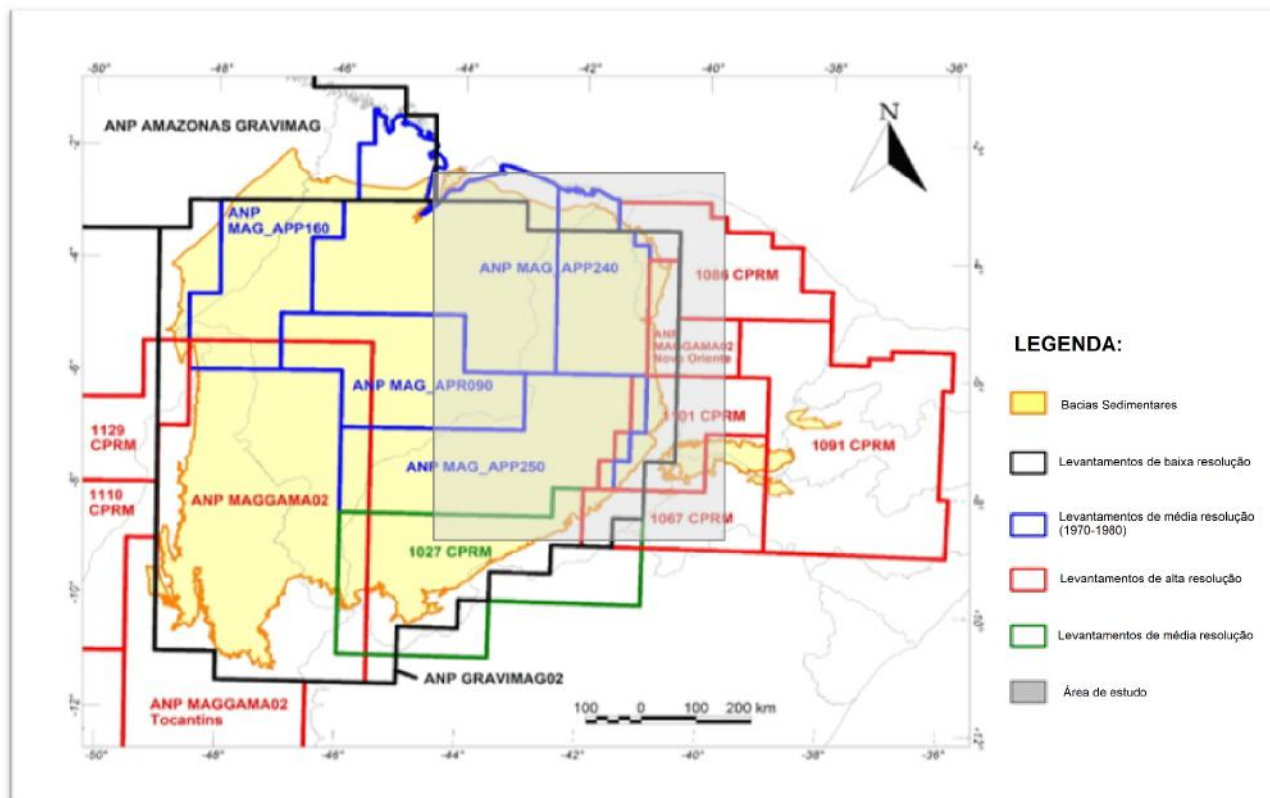


Figura 7: Mapa dos levantamentos aerogeofísicos cedidos pelo Projeto Alagoas.

4.1.1.2. Poços

Foram adquiridos os dados de noventa e nove poços, de domínio público, cedidos pela ANP. Através dos perfis compostos, foram catalogados cada pacote ígneo superior a um metro. A seguir, o mapa com a distribuição dos mesmos na área de estudo (Figura 8). A tabela completa com a identificação de todos os poços e suas espessuras ígneas encontra-se disponível no anexo deste documento.

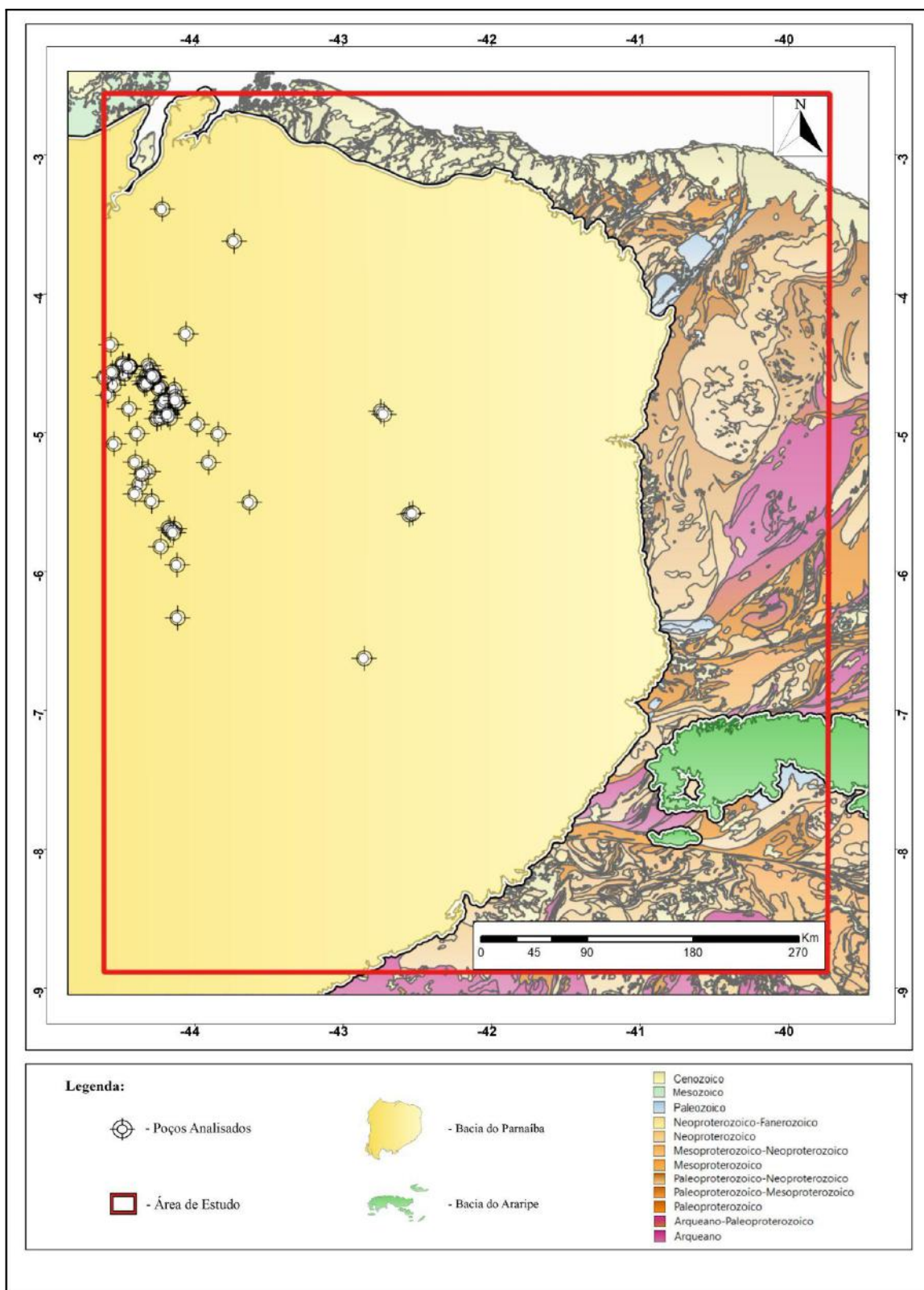


Figura 8: Mapa de distribuição dos poços analisados dentro da área de interesse.

4.1.1.3. MAPAS GEOLÓGICOS

Para o estudo da geologia da Bacia do Parnaíba e da Província Borborema, foram consultados os mapas geológicos, de domínio público, da CPRM, e o mapa geológico cedido pelo Projeto Alagoas, através do Centro Digital de Geoprocessamento Gondwana (CDGG).

4.1.2. *SOFTWARES UTILIZADOS*

O Oasis Montaj - Seequent, principal *software* utilizado no presente trabalho, foi utilizado para filtragem e interpretação dos dados geofísicos.

O Excel foi utilizado para catalogar todos os poços adquiridos, assim como cada intervalo ígneo e o cálculo de valor agregado a cada poço, de acordo com a profundidade e espessura dos corpos ígneos. O *software* também foi utilizado, em conjunto com o Visible Geology - Stereonet, para gerar as rosetas dos lineamentos interpretados.

O *software* QGIS também foi utilizado para realizar interpretações em geral, além de gerar as imagens de krigagem e elaborar o *layout* dos mapas finais, com o auxílio do *software* CorelDraw.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. FILTROS E MÉTODOS DE REALCE

4.2.1.1. AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO (ASA)

A Amplitude do Sinal Analítico (ASA), introduzida por NABIGHIAN (1972), é a raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas horizontais e verticais (Equação 1). O filtro é útil na localização dos centros das fontes magnéticas (Figura 9), principalmente onde a remanência e/ou baixa latitude magnética dificultam a interpretação, como é o caso. Este filtro foi utilizado, principalmente, para identificar e mapear as rochas das formações ígneas da bacia do Parnaíba e os diques máficos presentes na Província Borborema.

$$|A(x, y)| = \left[\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

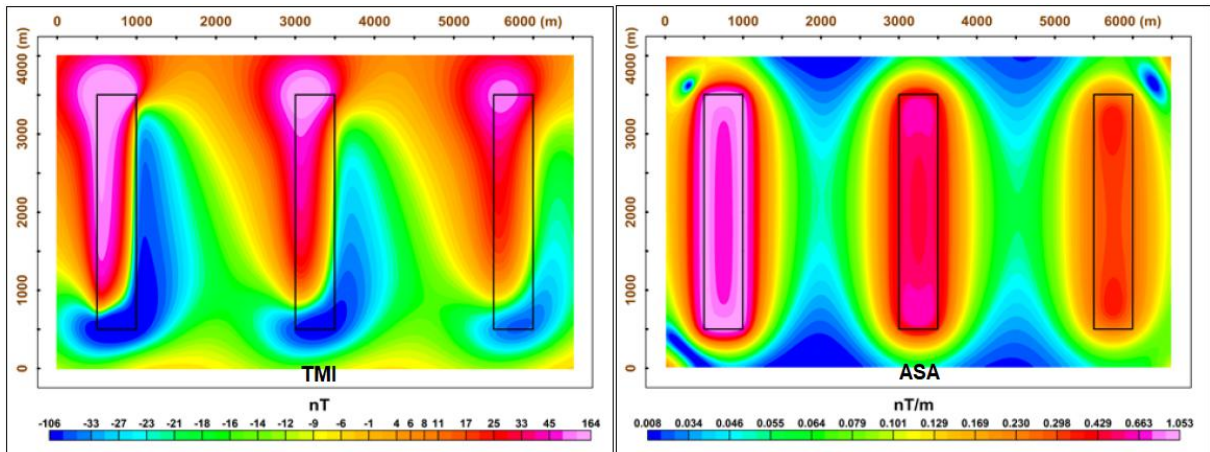


Figura 9: Comparação dos resultados de filtragem TMI e ASA em diferentes profundidades. Fonte: Modificado (FERREIRA, 2010).

4.2.1.2. INCLINAÇÃO DO SINAL ANALÍTICO (ISA)

O ISA é o inverso da tangente da divisão entre a derivada vertical (GZ) e o gradiente horizontal total (GHT) (Equação 2). É o ângulo entre o gradiente horizontal total e o gradiente vertical. Útil para mapear estruturas de embasamento e alvos profundos (MILLER; SINGH, 1994) (Figura 10). O objetivo da utilização deste filtro no presente trabalho é justamente facilitar a interpretação das feições estruturais mais profundas.

$$ISA = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{GZ}{GHT} \right) \quad (2)$$

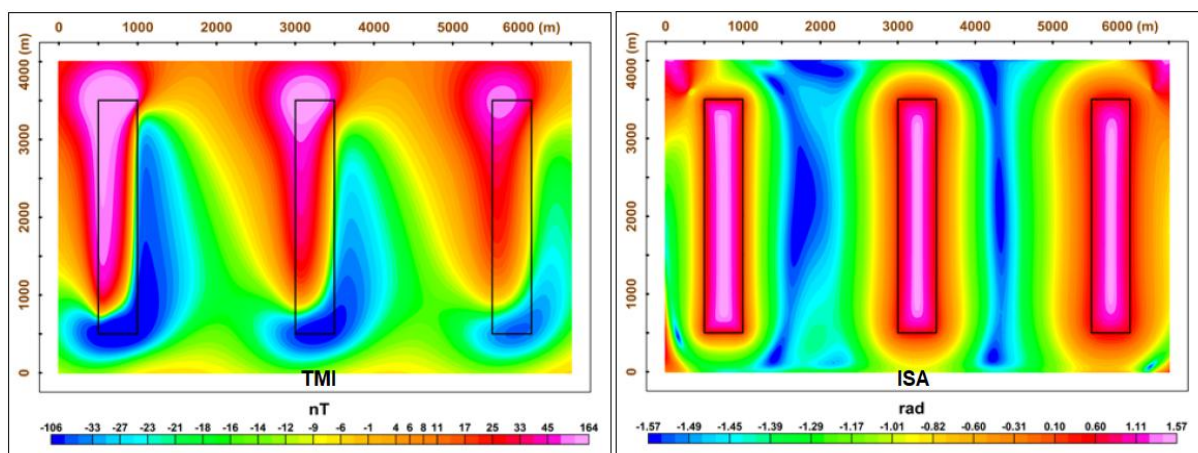


Figura 10: Comparação dos resultados de filtragem TMI e ISA em diferentes profundidades. Fonte: Modificado (FERREIRA, 2010).

4.2.1.3. DERIVADA HORIZONTAL LONGITUDINAL (GX)

É comum o uso das derivadas verticais e horizontais em dados magnéticos. O GX é a derivada horizontal longitudinal (Equação 3). Este filtro destaca as feições de direções N-S e enfraquece os sinais E-W.

$$Dx = \frac{\partial M}{\partial x} \quad (3)$$

4.2.1.4. FILTRAGEM DE POÇOS A PARTIR DE VALOR AGREGADO

Para uma análise adequada dos dados dos poços, apenas o somatório das espessuras não era suficiente. De acordo com MICHAUD (2013), o campo magnético do dipolo decai com o inverso do cubo da distância. Portanto, foi elaborada, nesta pesquisa, a equação a seguir (Equação 4), que multiplica a espessura pelo inverso do cubo da profundidade. Ou seja, quanto mais raso o corpo ígneo, maior o valor agregado, mas sempre considerando sua espessura. A multiplicação por dez elevado à sétima potência é meramente por razões de arredondamento.

$$\text{Valor Agregado} = \text{Espessura} * \frac{10^7}{\text{Profundidade}^3} \quad (4)$$

Alguns poços apresentaram apenas um espesso pacote ígneo, enquanto outros apresentaram até oito pacotes de variadas espessuras. Por isso, foi aplicada essa equação para cada intervalo de rocha ígnea em cada poço estudado. Depois de atribuída a equação, foi somado os valores obtidos de cada intervalo por poço. Em seguida, os valores foram separados em cinco grupos: Superior a 10 (vermelho); 10-3 (laranja); 3-2 (Verde); 2-1 (Azul); Inferior a 1 (Roxo); (Tabela 1).






Poço	1-Início(m)	1-Fim(m)	1-Espessura(m)	1-VALOR	Espessura Total(m)	Valor Agregado	Símbolo
1-OPEO-1-PI	487	608	121	10,48	<u>191</u>	11,33	
1-MA-1-PI	830	1090	260	4,55	<u>365</u>	4,70	
9-PAF-7-MA	660	682	22	0,77	<u>88</u>	2,49	
4-PGN-10-MA	890	947	57	0,81	<u>222</u>	1,65	
7-GVR-21D-M	1092	1112	20	0,15	<u>187</u>	0,83	

Tabela 1: Recorte da tabela do cálculo de valor agregado a cada poço.

4.2.2. FERRAMENTAS DE KRIGAGEM

Visando uma melhor visualização e interpretação dos dados obtidos nos poços, foi utilizado o método de Krigagem Ordinária, de modelo esférico, no *Software* QGIS. A Krigagem é um modelo de interpolação espacial, que consiste em métodos geoestatísticos para a estimativa de pontos, que utiliza o modelo variograma como objetivo de estimar pontos não amostrados. Os valores estimados são uma combinação linear dos valores de entrada.

A Krigagem, ao contrário de outros métodos de interpolação matemática, estima uma matriz de covariância espacial que permite determinar os pesos atribuídos às diferentes amostras, a redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (GOOVAERST, 1997).

5. RESULTADOS

5.1. MAPAS MAGNÉTICOS E FERRAMENTAS DE REALCE

5.1.1. MAPA CAMPO MAGNÉTICO TOTAL (TMI)

O mapa de Campo Magnético Total (TMI) representa o valor original da resposta magnetométrica e, portanto, serve como base para todos os resultados subsequentes. Este mapa é gerado a partir da interpolação dos dados distribuídos nas linhas de voo da aeromagnetometria (Figura 11).

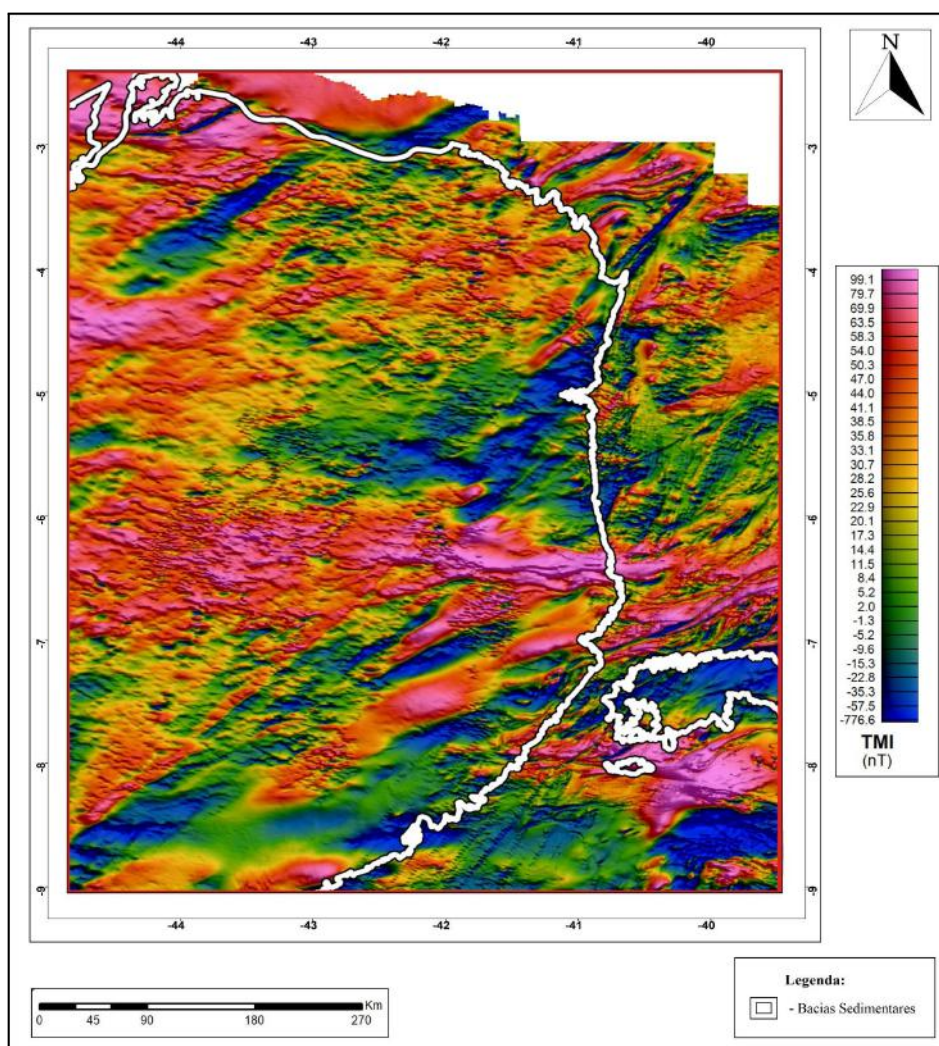


Figura 11: Mapa do campo magnético total (TMI).

5.1.2. MAPA AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO (ASA)

O ASA foi o principal filtro utilizado para mapear os diques máficos e as rochas ígneas das formações Sardinha e Mosquito. Foi utilizada uma técnica chamada *Matched Filtering*, no Oasis Montaj, para a divisão dos sinais magnéticos em diferentes faixas de profundidades (COWAN *et al.*, 1993). Estas faixas foram divididas de acordo com a imagem sísmica profunda de DALY *et al.* (2014) (Figura 12) e respeitando a superfície de Curie, onde abaixo desta superfície as rochas perdem suas propriedades magnéticas permanentes. Segundo DANTAS (2014), a superfície de Curie média na Bacia do Parnaíba fica em torno de 20 km de profundidade.

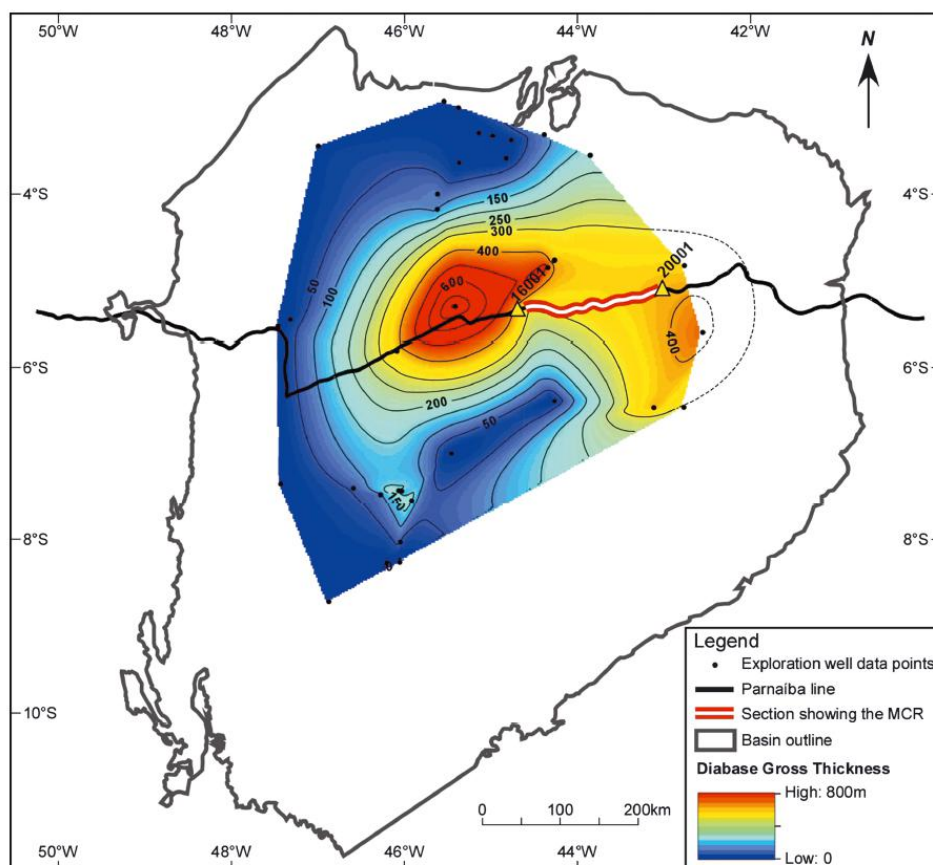


Figura 12: Seção sísmica de profundidade de um seção E -W da Bacia do Parnaíba. Fonte: (DALY *et al.*, 2014).

Portanto, as faixas escolhidas foram as de: 20-10 km (Área mais profunda do embasamento e acima da superfície de Curie); 10-4 km (embasamento mais raso); 4-2 km (área profunda da bacia); 2 km-topo (área rasa até o topo) (Figura 13).

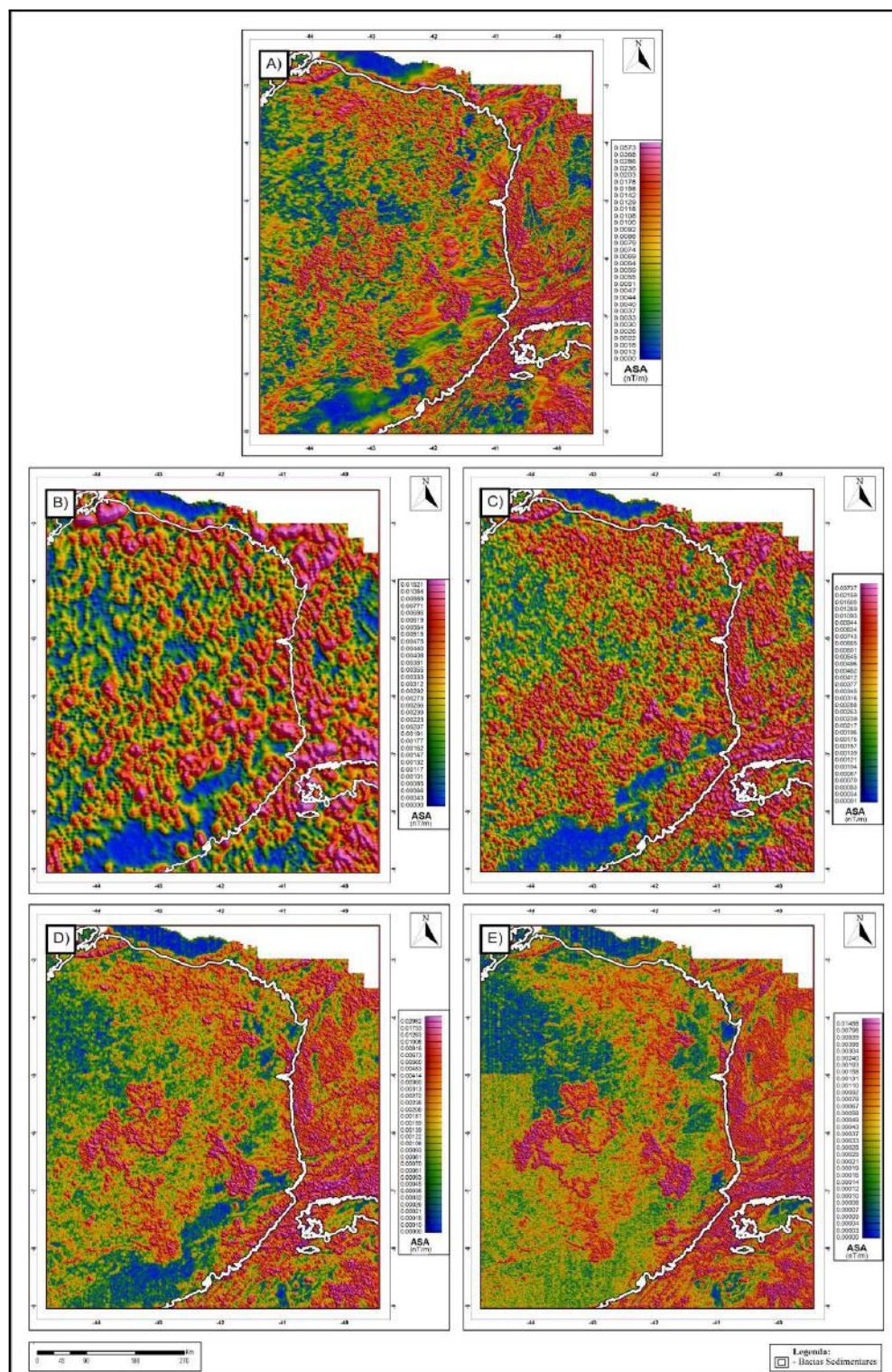


Figura 13: Mapas da amplitude do sinal analítico (ASA) original e após técnica *Matched Filtering*. (A) - ASA original; (B) - ASA 20-10 km; (C) - ASA 10-4 km; (D) - ASA 4-2 km; (E) ASA 2 km - topo.

5.1.3. MAPA INCLINAÇÃO DO SINAL ANALÍTICO (ISA)

O ISA foi o principal filtro utilizado para analisar as características estruturais da área de estudo. Ao usar derivadas horizontais e verticais, esse filtro pode exibir as feições mais profundas do embasamento. O sombreamento deste filtro tem uma orientação de 135° , que tende a enfatizar melhor a maioria das feições estruturais, especialmente o Lineamento Transbrasiliano. (Figura 14)

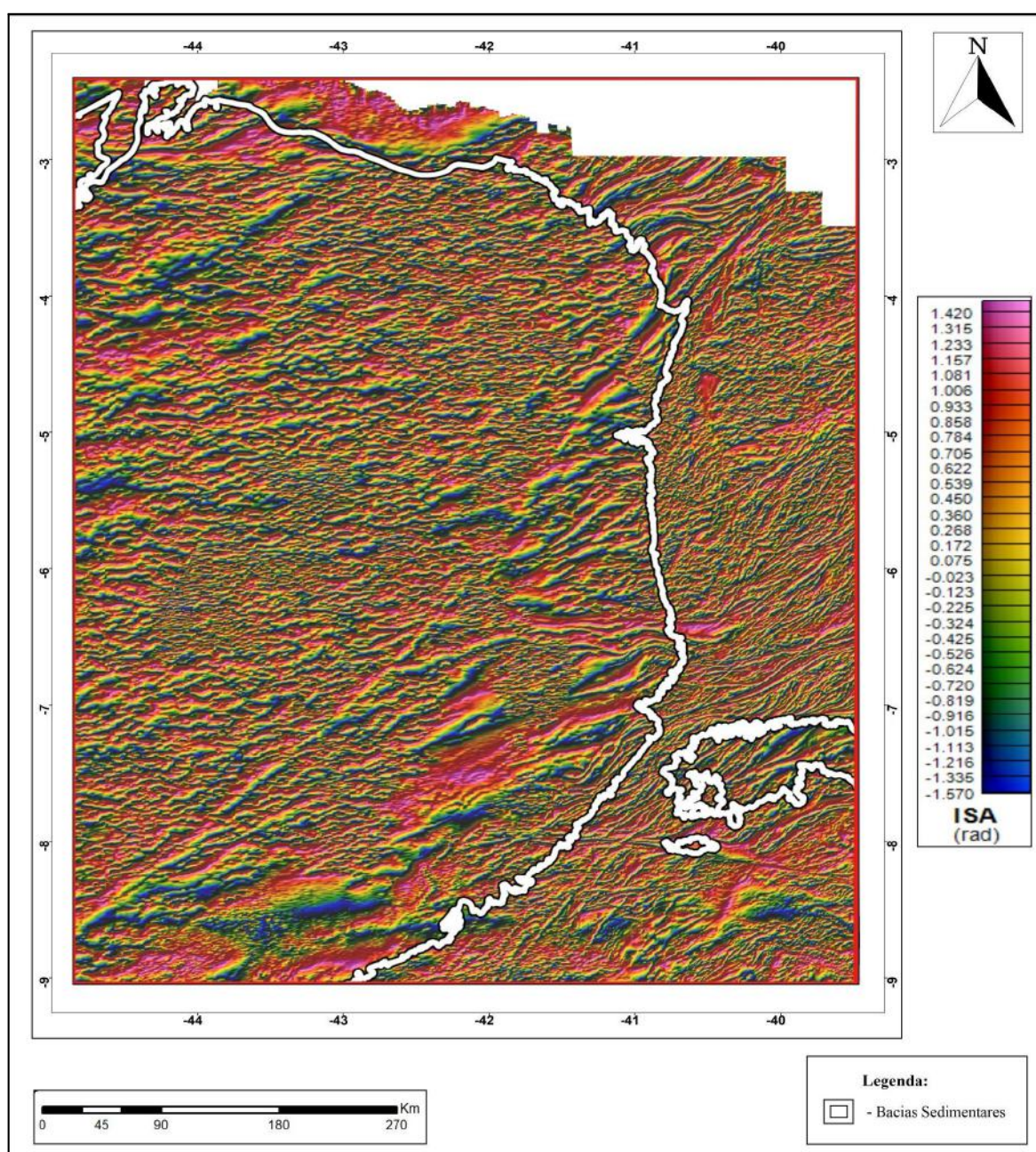


Figura 14: Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) com sombreamento a 135° .

5.1.4. MAPA DERIVADA HORIZONTAL LONGITUDINAL (GX)

As derivadas horizontais representam as variações de intensidade do campo magnético nas direções x e y. Por conta da forte presença de lineamentos horizontais E-W nos dados magnéticos desta área, o filtro GX foi essencial para mascarar as feições com essa orientação e realçar os com orientação N-S, assim como os diagonais. (Figura 15)

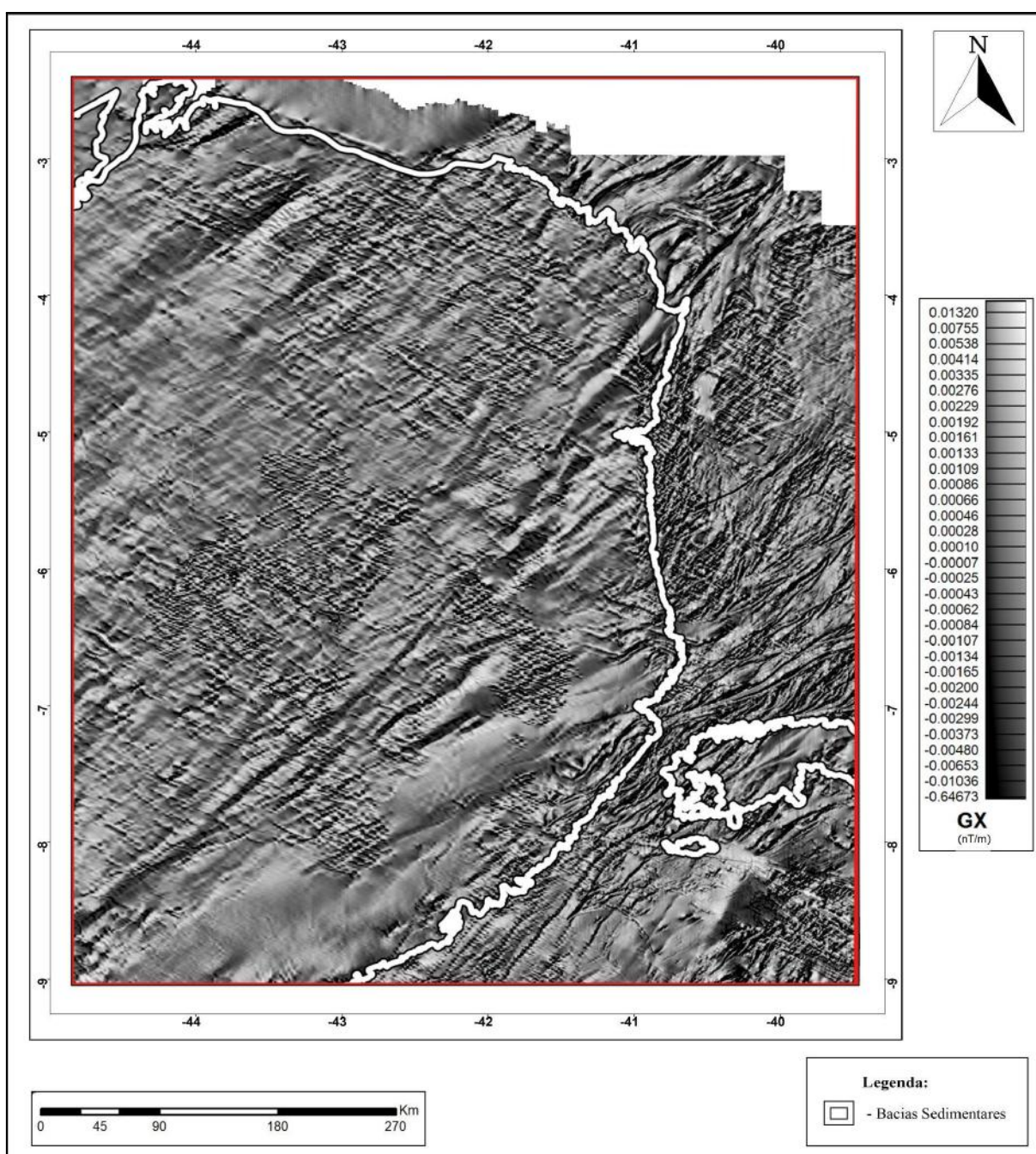


Figura 15: Mapa da derivada horizontal longitudinal (GX).

5.2. INTERPRETAÇÕES

5.2.1. DIQUES MÁFICOS

Foram estudados os diques máficos mapeados por PESSANO *et al.* (2021) e CPRM em conjunto com o Mapa ASA. Os diques mapeados pelos autores citados foram prolongados de acordo com a intensidade anômala mostrada pela Amplitude do Sinal Analítico. Em seguida, foi elaborada uma roseta com a orientação dos diques, a qual apresentou uma direção média de 038° (Figura 16).

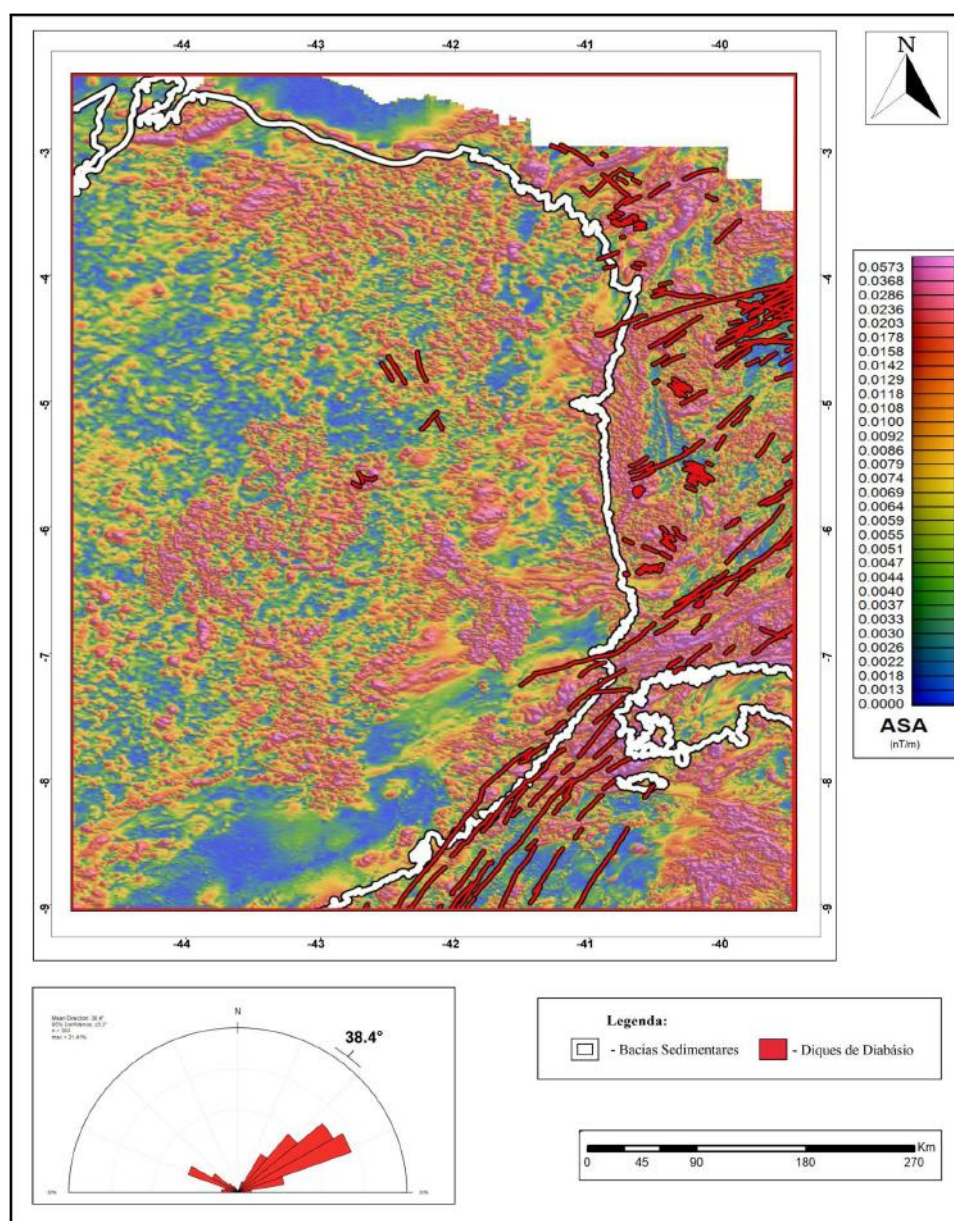


Figura 16: Mapa ASA com interpretação dos diques mapeados.

5.2.2. FEIÇÕES ESTRUTURAIS DÚCTEIS

O Mapa ISA destacou os principais lineamentos de toda a área de estudo, inclusive os que são enfraquecidos quando por debaixo das bacias sedimentares. Portanto, com base nos dados observados e no estudo bibliográfico, foram delimitados, manualmente, as principais zonas de cisalhamento da Província Borborema e suas continuidades por debaixo das bacias do Parnaíba e Araripe (Figura 17). As zonas de cisalhamentos principais identificadas foram: Tentugal; Granja; Transbrasiliiano; Tauá; Senador Pompeu; Tatajuba; Patos; Pernambuco.

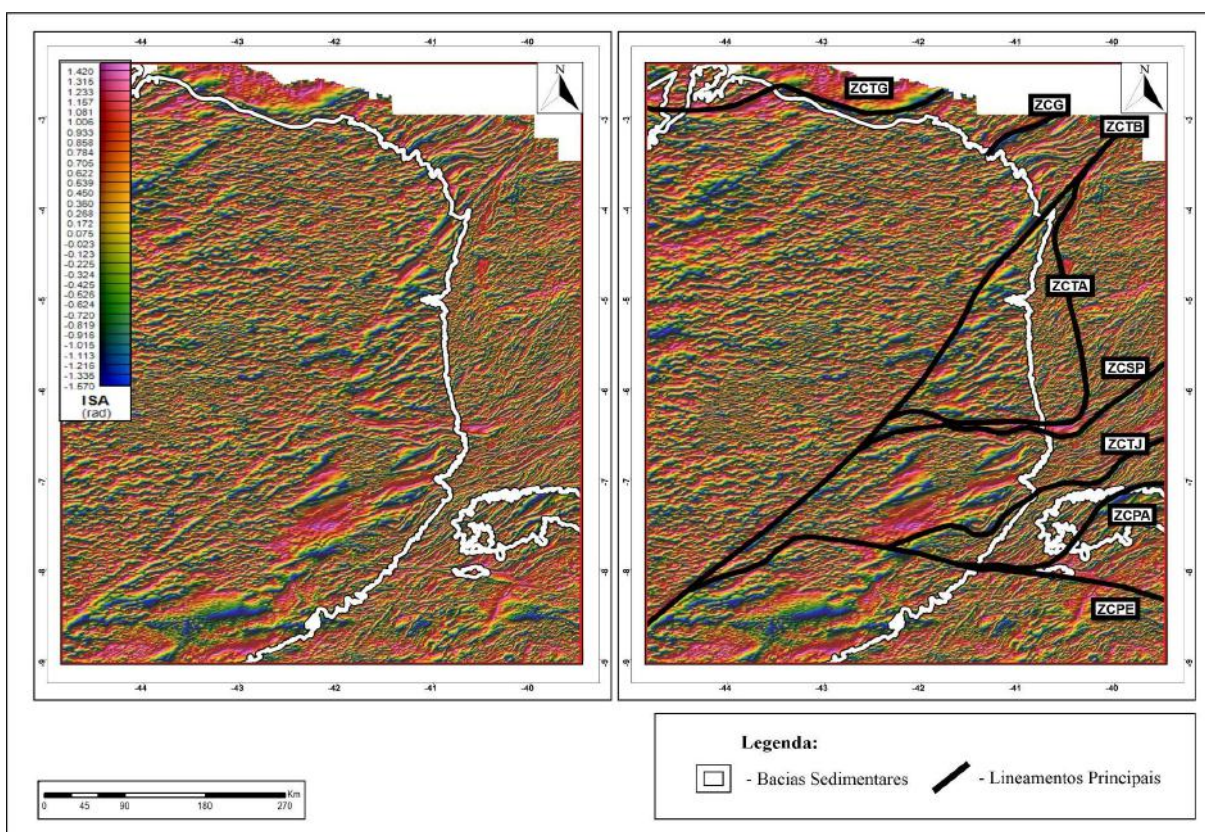


Figura 17: Mapas ISA com e sem interpretação das principais zonas de cisalhamento da Província Borborema.

(ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliiano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;

Este mapa também foi manuseado para interpretar lineamentos secundários e terciários (Figura 18). Os secundários possuem uma alta resposta anômala, assim como os principais,

porém nem sempre são zonas de cisalhamento, ou então são pouco conhecidas na literatura. Já os terciários são lineamentos menores mapeados na escala de 1:1.000.000, no entanto, são vitais na compreensão do estruturamento da Província Borborema e dos embasamentos das bacias Parnaíba e Araripe.

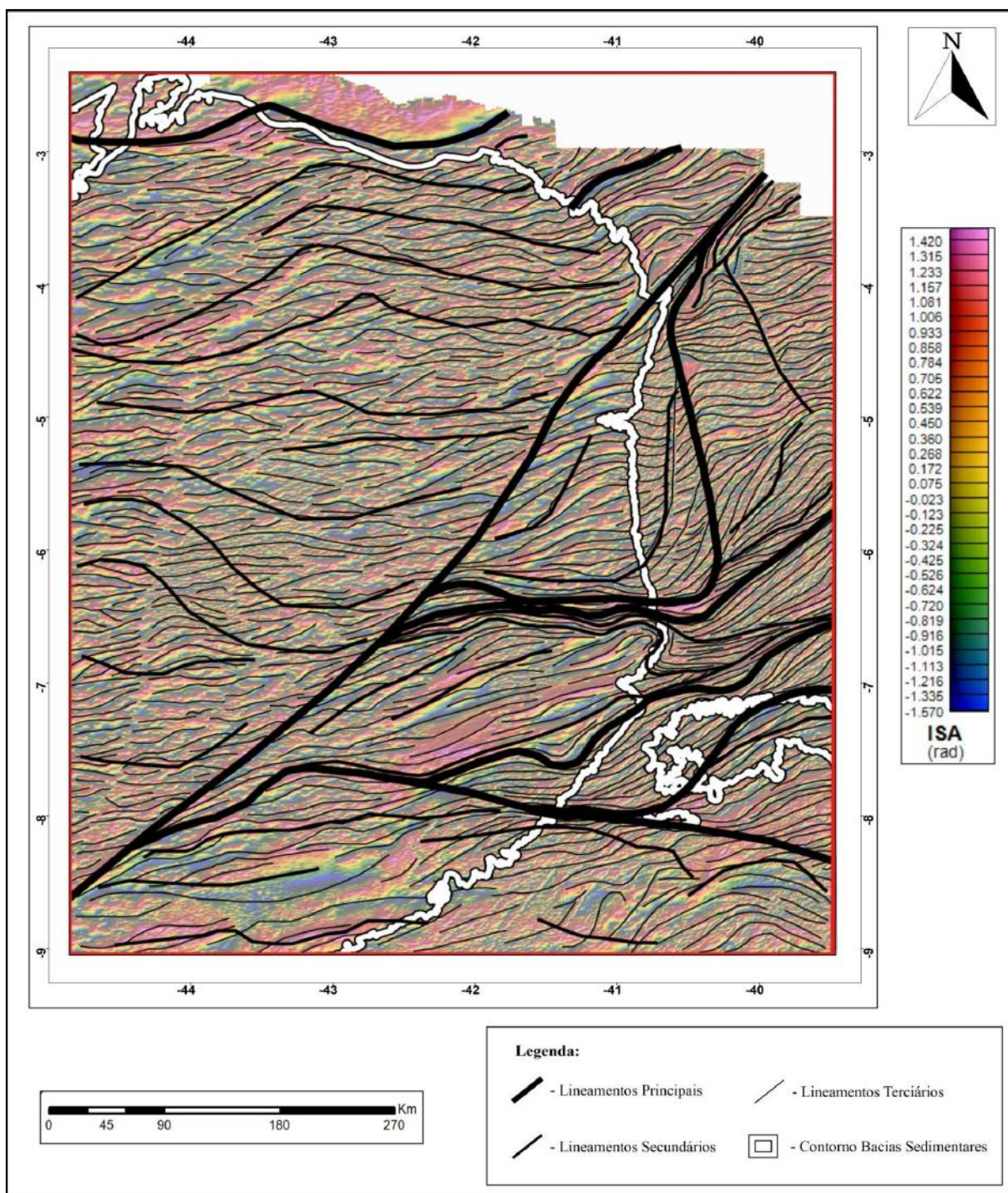


Figura 18: Mapa ISA com interpretação dos lineamentos estruturais da área de estudo.

5.2.3. FEIÇÕES ESTRUTURAIS RÚPTEIS

Estas feições só foram melhores identificadas através do Filtro GX, visto que os lineamentos horizontais atrapalham as individualizações das estruturas com orientações divergentes. Estes lineamentos foram descritos como rúpteis por serem, em sua maioria, retilíneos e quase sempre cortando as outras feições. Foram identificadas duas principais orientações NE-SW (Figura 19) e NW-SE (Figura 20), com média de 051° e 300° , respectivamente.

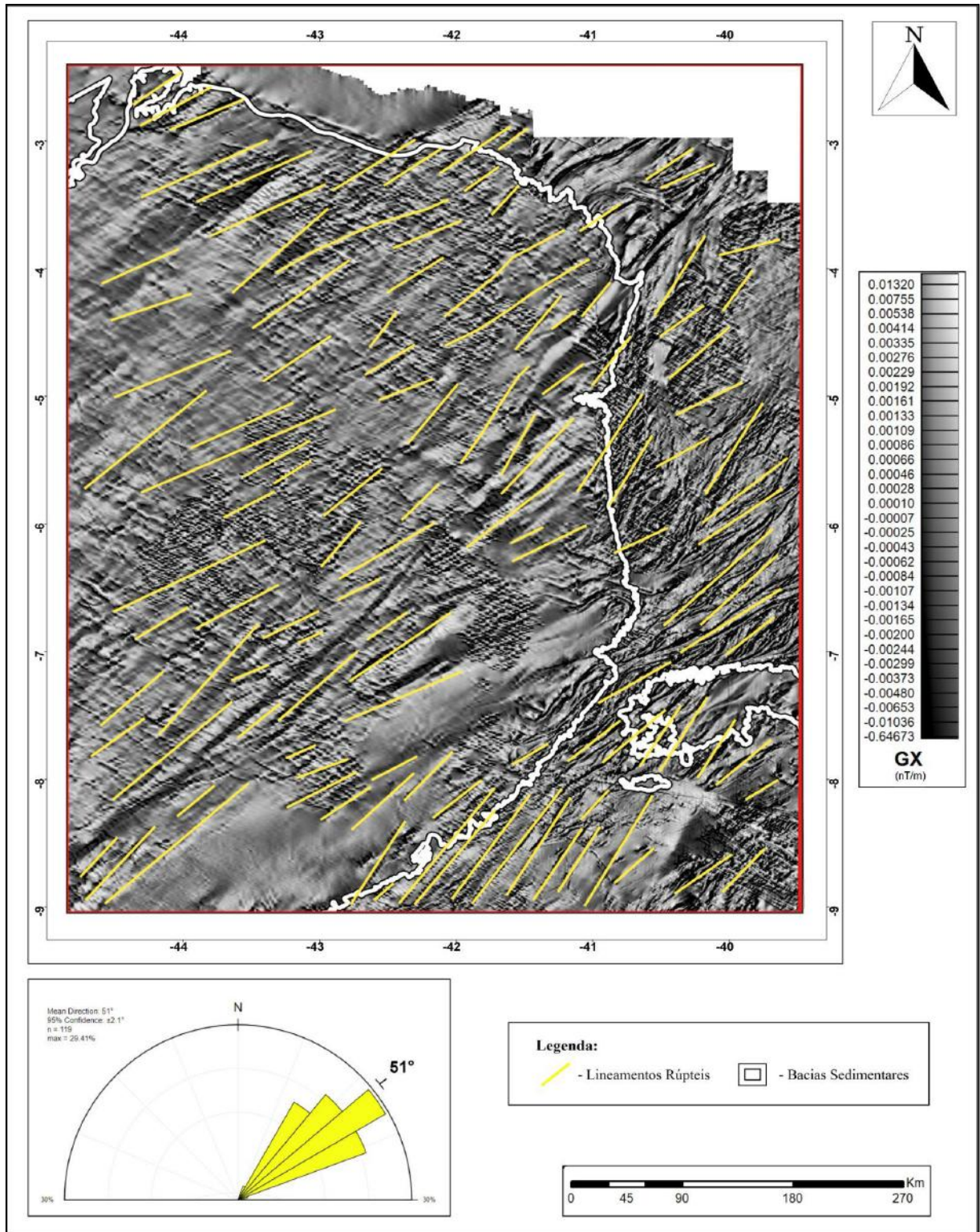


Figura 19: Mapa GX com interpretações de lineamentos rúpteis NE-SW.

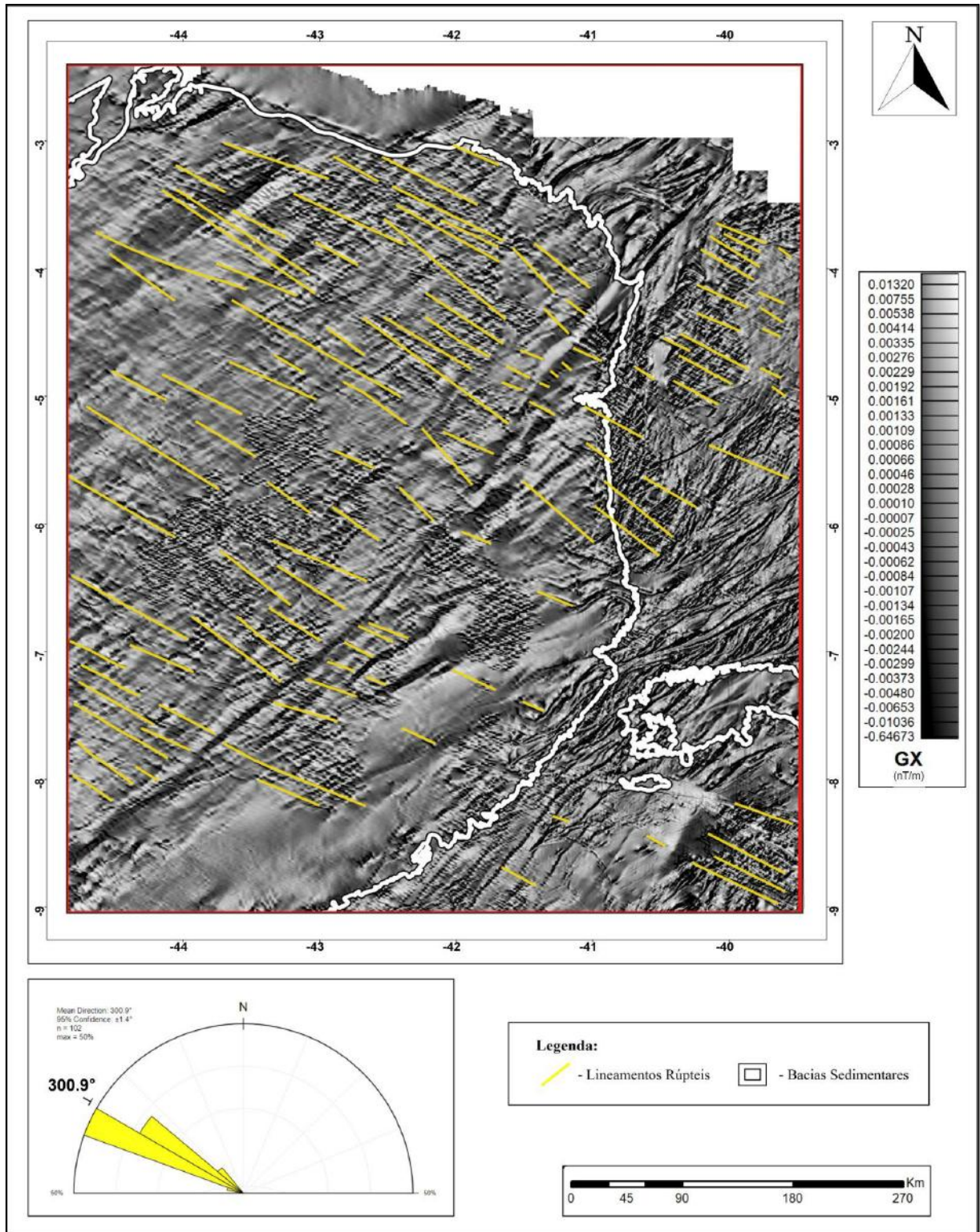


Figura 20: Mapa GX com interpretações de lineamentos rúpteis NW-SE.

5.3. DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

Os domínios magnéticos são divididos e categorizados através da média da intensidade magnética total, em nanotesla (nT), da região e também pelas características estruturais da mesma. Portanto, foram utilizados os mapas ASA, para a identificação das fontes magnéticas, e o mapa TMI, para o cálculo da intensidade magnética média em cada domínio. Os domínios foram divididos de A - H, sendo A, B e C domínios no interior da bacia do Parnaíba e o restante no exterior. (Figura 21)

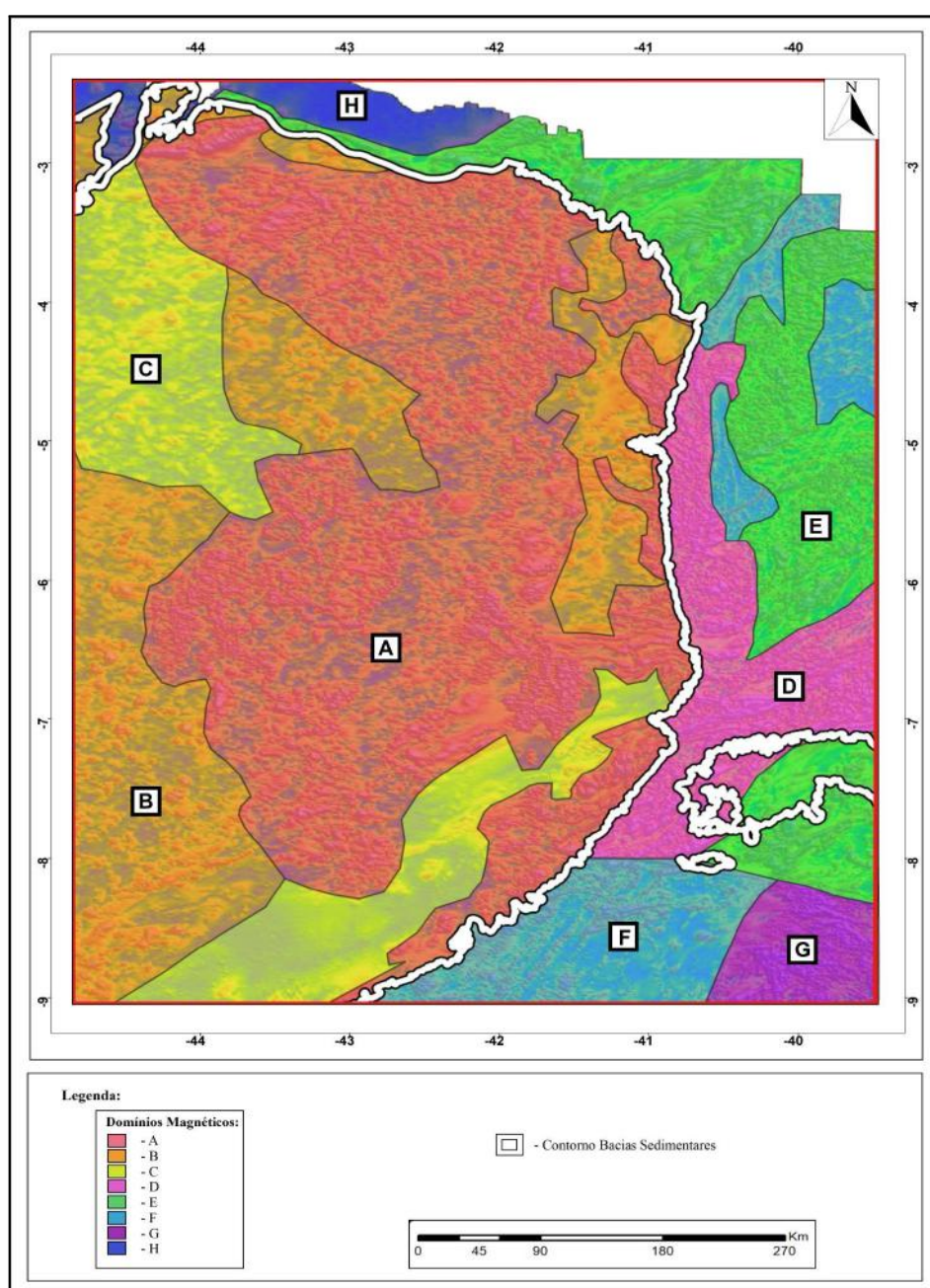


Figura 21: Mapa de domínios magnéticos.

Domínio A: Maiores valores anômalos no interior da bacia. Caracterizada principalmente pela presença de rochas ígneas das formações Sardinha e Mosquito. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,012 nT.

Domínio B: Valores anômalos intermediários no interior da bacia. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,006 nT.

Domínio C: Menores valores anômalos no interior da bacia. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,003 nT.

Domínio D: Maiores valores anômalos no exterior da bacia. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,028 nT. Área com alta concentração de diques máficos e zonas de cisalhamento.

Domínio E: Valores anômalos intermediários no exterior da bacia. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,013 nT.

Domínio F: Menores valores anômalos no exterior da bacia. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,009 nT.

Domínio G: Forte anomalia positiva no exterior da bacia. Esta região agrega rochas do Cráton do São Francisco, assim justificando a alta nas respostas magnéticas. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,026 nT.

Domínio H: Anomalia negativa no exterior da bacia. Esta região se configura como o limite entre a Bacia do Parnaíba e o Cráton de São Luís. O valor médio do domínio no filtro ASA é de 0,002 nT.

5.4. FERRAMENTAS DE KRIGAGEM

5.4.1. KRIGAGEM DA ESPESSURA

A Krigagem de espessura levou em conta todos os poços da ANP disponíveis na área de interesse. Foram catalogadas e somadas todas as espessuras das rochas ígneas discriminadas nestes poços. Os *clusters* foram divididos em seis grupos: Inferior a 100 m; 100-200 m; 200-300 m; 300-400 m; 400-500 m; superior a 500 m. (Figura 22)

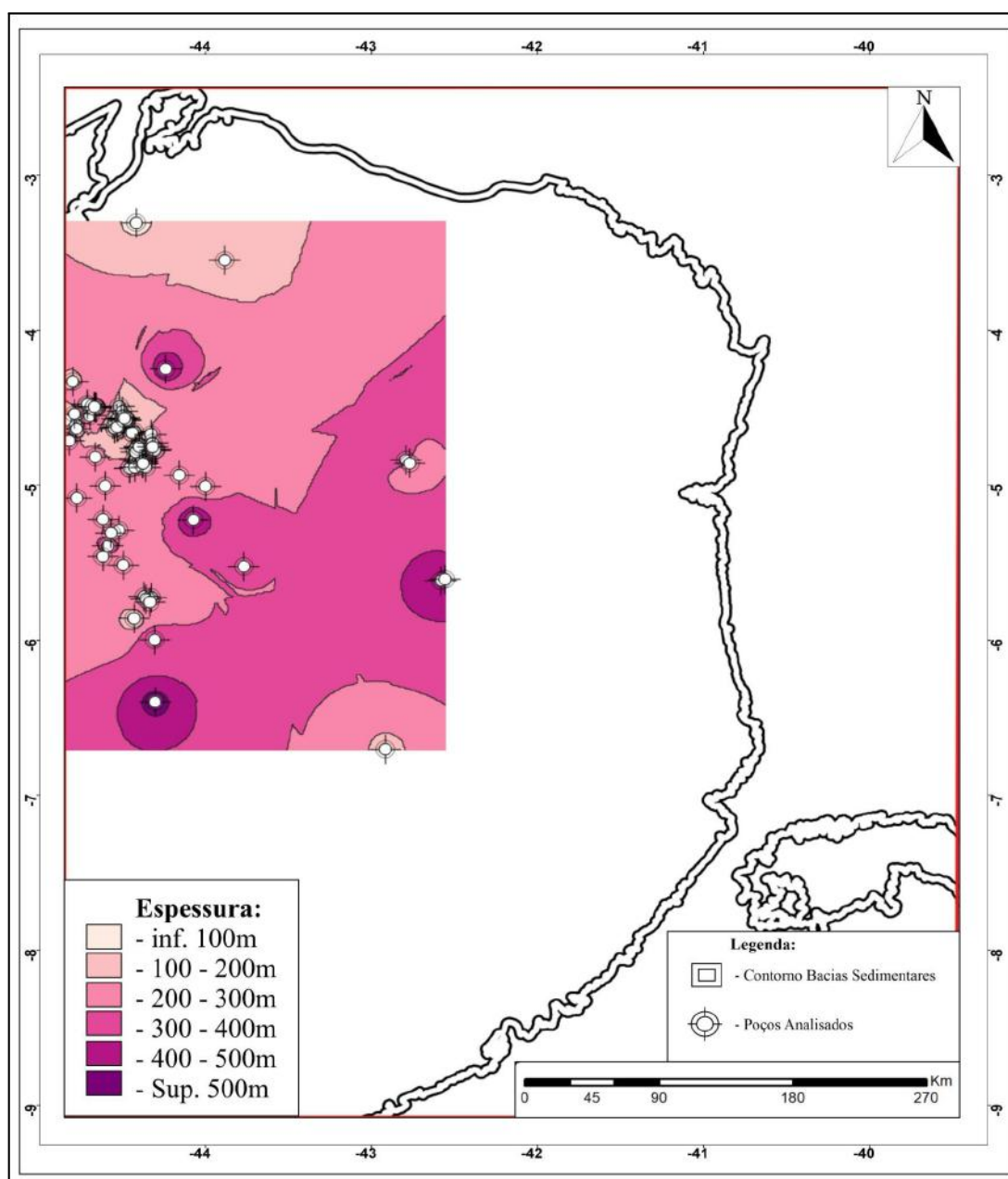


Figura 22: Mapa da krigagem de espessura com distribuição dos poços analisados.

5.4.2. KRIGAGEM DA PROFUNDIDADE

A krigagem de profundidade levou em conta todos os poços da ANP disponíveis na área de interesse. Foram catalogadas todas as profundidades da primeira aparição ígnea de todos os poços. Com isso, foi possível observar onde estão as ígneas mais rasas. Os *clusters* foram divididos em oito grupos: Superior a 200 m; 200-400 m; 400-600 m; 600-800 m; 800-1000 m; 1000-1200 m; 1200-1400 m; inferior a 1400 m. (Figura 23)

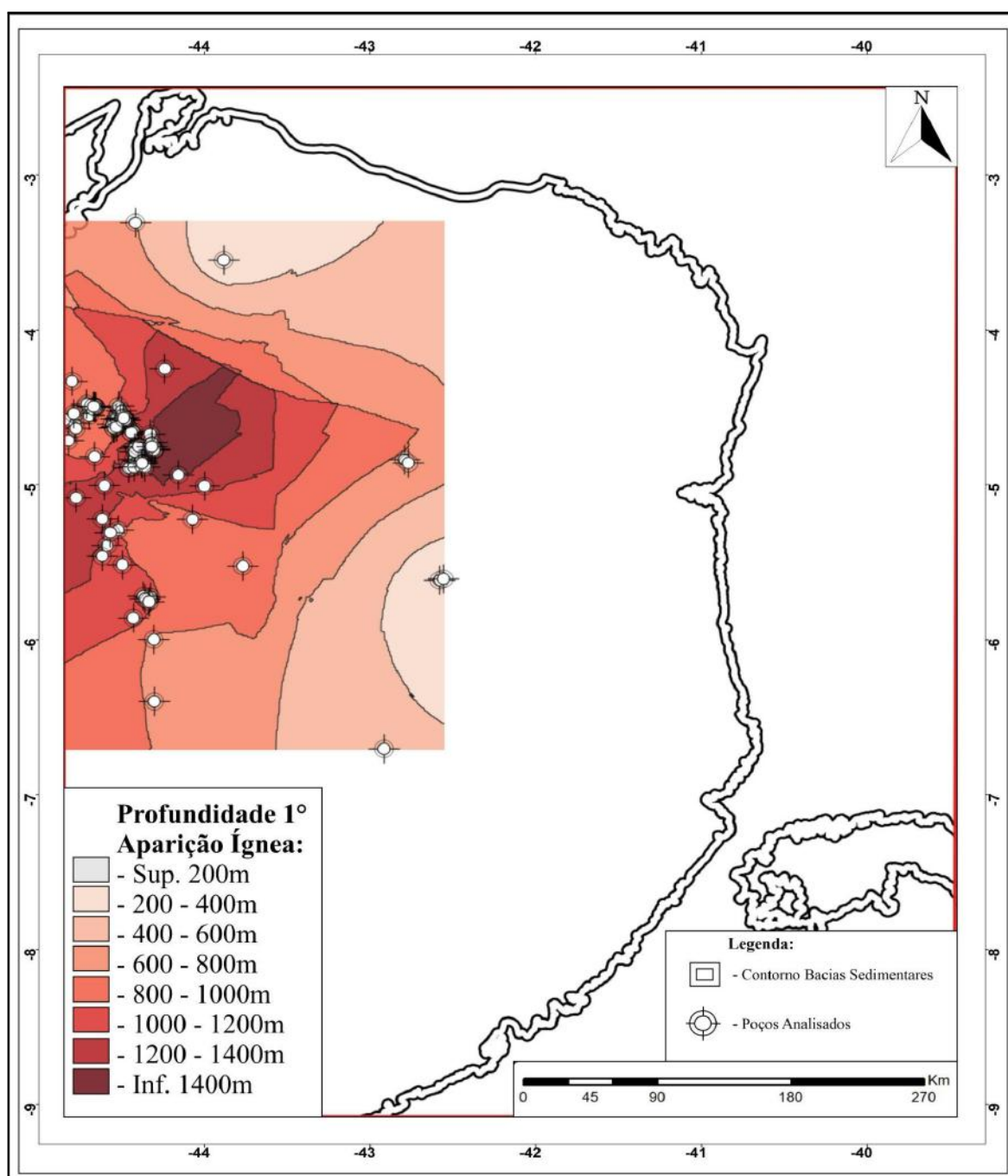


Figura 23: Mapa da krigagem da profundidade na 1º aparição ígnea, com distribuição dos poços analisados.

6. DISCUSSÕES

6.1. POÇOS ANALISADOS E ROCHAS ÍGNEAS

Os Diques Rio Ceará Mirim foram prolongados a partir dos diques, mapeados remotamente por PESSANO *et al.* (2021). O autor catalogou diques já mapeados em outros trabalhos e utilizou ferramentas magnetométricas e radiométricas. No entanto, como o estudo englobava enxames de diques de todo o Brasil, não foi dado o detalhamento desejado na região deste projeto. Por conta da diferença composicional entre essas rochas, a utilização da radiometria foi fundamental para distinguir diques máficos e graníticos. Aconselha-se o uso desta técnica em futuras pesquisas de detalhe na região oeste da Província Borborema.

Uma das finalidades deste trabalho é mapear a extensão em subsuperfície das rochas ígneas dentro da Bacia do Parnaíba. O melhor filtro para atingir este objetivo foi o ASA, pois ele centraliza as fontes magnéticas dos corpos ígneos. Todavia, tendo em vista que a bacia tem em média 4 km de espessura, e que o embasamento tem no mínimo 20 km, é difícil distinguir o que é sinal do embasamento e o que são sinais das ígneas das formações da bacia. Por esta razão, foi aplicado o *Matched Filtering* nos dados do ASA. Com isso, foi possível separar a profundidade dos dados obtidos.

Portanto, foram escolhidos os filtros ASA de profundidade 4-2 km e 2 km-topo (Figura 13 (D) e (E)) para delimitar a possível extensão em subsuperfície das ígneas. Na imagem a seguir (Figura 24), foi retirado toda resposta magnética e mantido o sombreamento da imagem. Foram delimitadas áreas onde, provavelmente, devem ocorrer rochas ígneas dentro da bacia. Estas áreas delimitadas servirão para acompanhar análises ainda não abordadas no texto.

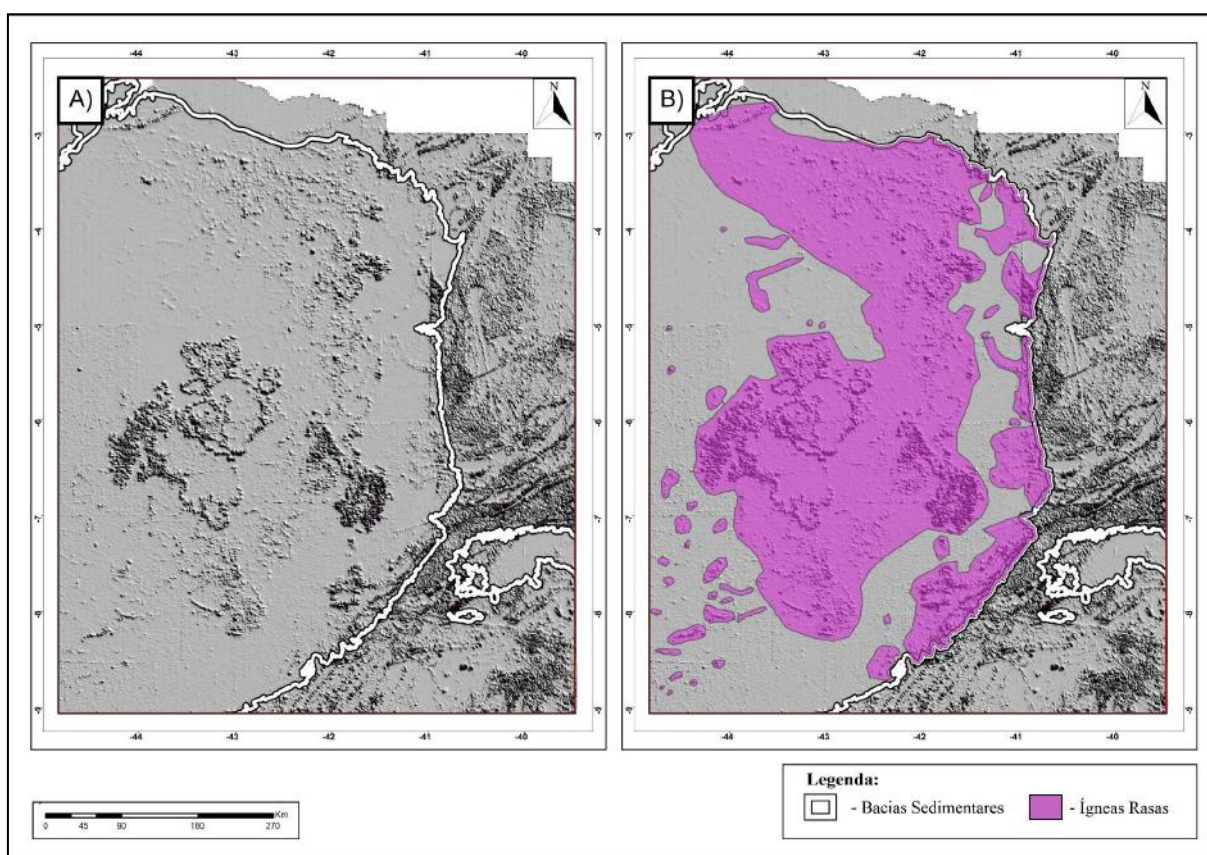


Figura 24: (A) - Sombreamento dos mapas ASA rasos; (B) - Sombreamento dos mapas ASA rasos com interpretação da extensão de ígneas rasas em subsuperfície.

A seguir, temos uma imagem com dois mapas, Mapa ASA e Mapa Krigagem de Espessura (Figura 25). No segundo mapa, foi sobreposta a área delimitada da figura anterior (Figura 24), só que desta vez de forma hachurada. Ambos os mapas possuem identificadores que mostram quais poços possuem, no mínimo, 400 m de espessura em rochas ígneas.

No primeiro mapa, foram localizados apenas dois poços, com espessura superior a 400 m, que estão sobre altos valores anômalos positivos (cores mais quentes). O restante ficou em zonas intermediárias a baixas. No segundo mapa, vemos uma repetição do padrão, apenas dois pontos estão sobre a área delimitada.

Isto nos mostrou que a espessura do pacote ígneo não possui um peso muito importante na resposta magnética, pois se fosse, esses pontos deveriam estar nas áreas com maior valor.

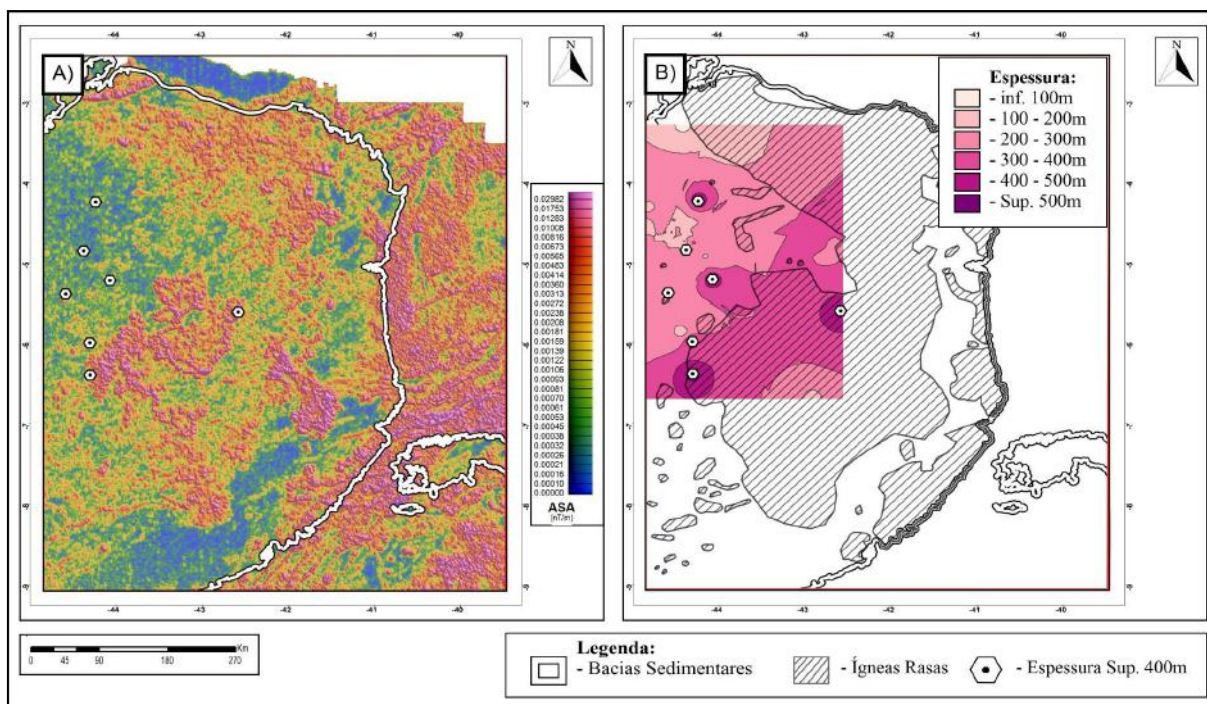


Figura 25: (A) - Mapa ASA 4-2 km com poços de espessura ígnea superior a 400 m; (B) - Mapa krigagem de espessura com poços de espessura ígnea superior a 400 m.

Após a conclusão anterior, foi pensado uma nova forma de categorizar os poços. Portanto, foi atribuído um valor agregado a cada poço. Foi catalogado cada pacote de mais de 1 m de rocha ígnea, em seguida somada sua espessura e atribuído um valor de acordo com o inverso ao cubo da profundidade (Equação 4). Ou seja, quanto menor a profundidade do pacote ígneo, maior o seu valor agregado, porém sem desconsiderar sua espessura.

Sendo assim, foi elaborada uma imagem (Figura 26) com quatro mapas utilizando os pontos de valor agregado. No primeiro mapa, é possível ver os pontos com os maiores valores posicionados sobre as anomalias de mais alto valor, os intermediários se aproximando destas anomalias e os de menor valor na região de baixo valor magnético. No segundo mapa, o padrão seguiu semelhante, os maiores valores inseridos na área delimitada e os intermediários próximos.

No terceiro mapa há uma Krigagem de profundidade, onde é apresentada uma interpolação da profundidade da primeira aparição ígnea dos poços. Nela é possível perceber que os pontos de menor valor estão localizados em regiões mais profundas. Foi desenhado, nos dois últimos mapas, uma linha interpretativa onde foi observado um contraste na profundidade, estando a esquerda da linha as maiores profundidades e a direita as mais rasas. É possível notar, no último mapa, que a linha interpretada segue a forma da área delimitada.

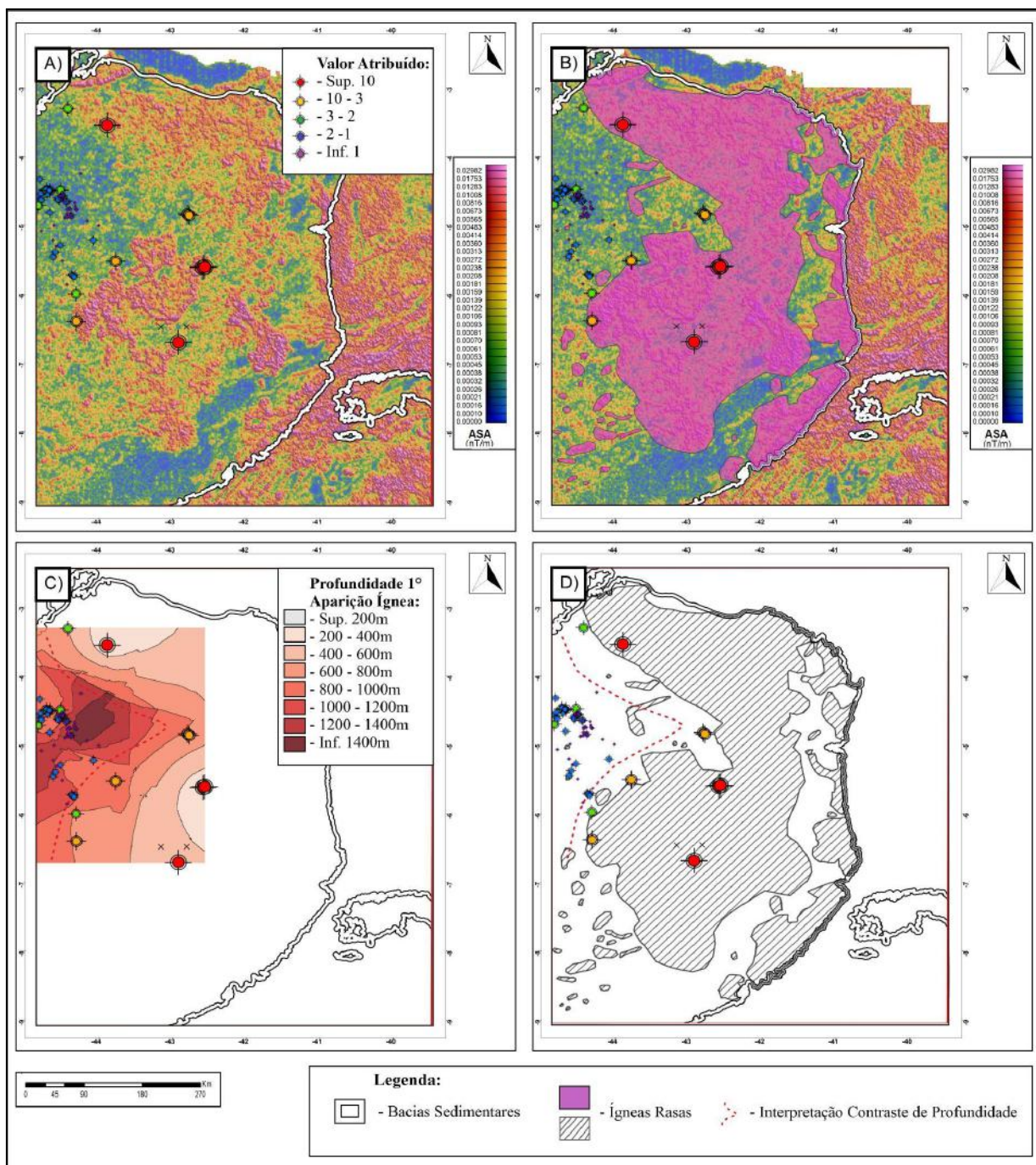


Figura 26: (A) - Mapa ASA 4-2 km com poços com valores agregados; (B) - Mapa ASA 4-2 km com poços com valores agregados e interpretação da extensão de ígneas rasas em subsuperfície; (C) - Mapa de Krigagem de profundidade de 1º aparição ígnea, com poços com valores agregados e interpretação do contraste de profundidade; (D) - Mapa dos poços com valores agregados, interpretação da extensão de ígneas rasas em subsuperfície e interpretação do contraste de profundidade.

Levando em conta a discussão do parágrafo anterior, percebemos que, na magnetometria, a profundidade da rocha é mais importante que sua espessura. Portanto, é possível afirmar que as feições mais anômalas dos mapas ASA rasos, gerados neste trabalho, correspondem a presença de rochas ígneas rasas dentro da Bacia do Parnaíba.

Então, com essa observação final a respeito dos poços analisados, foi possível elaborar um mapa da extensão em subsuperfície das ígneas rasas no interior da Bacia do Parnaíba (Figura 27). Este mapa contém as rochas aflorantes da Formação Sardinha, mapeadas pela CPRM. Contudo, sabe-se que estes afloramentos ainda estão sendo debatidos e em breve teremos uma atualização. Inclusive, FERNANDES *et al.* (2020) mostraram que a borda leste da Bacia do Parnaíba não possui rochas ígneas exclusivamente da Formação Sardinha, como também da Formação Mosquito. Enquanto não houver atualização dos dados fornecidos pela CPRM, utilizaremos o mapeamento mais recente até a data de publicação deste trabalho.

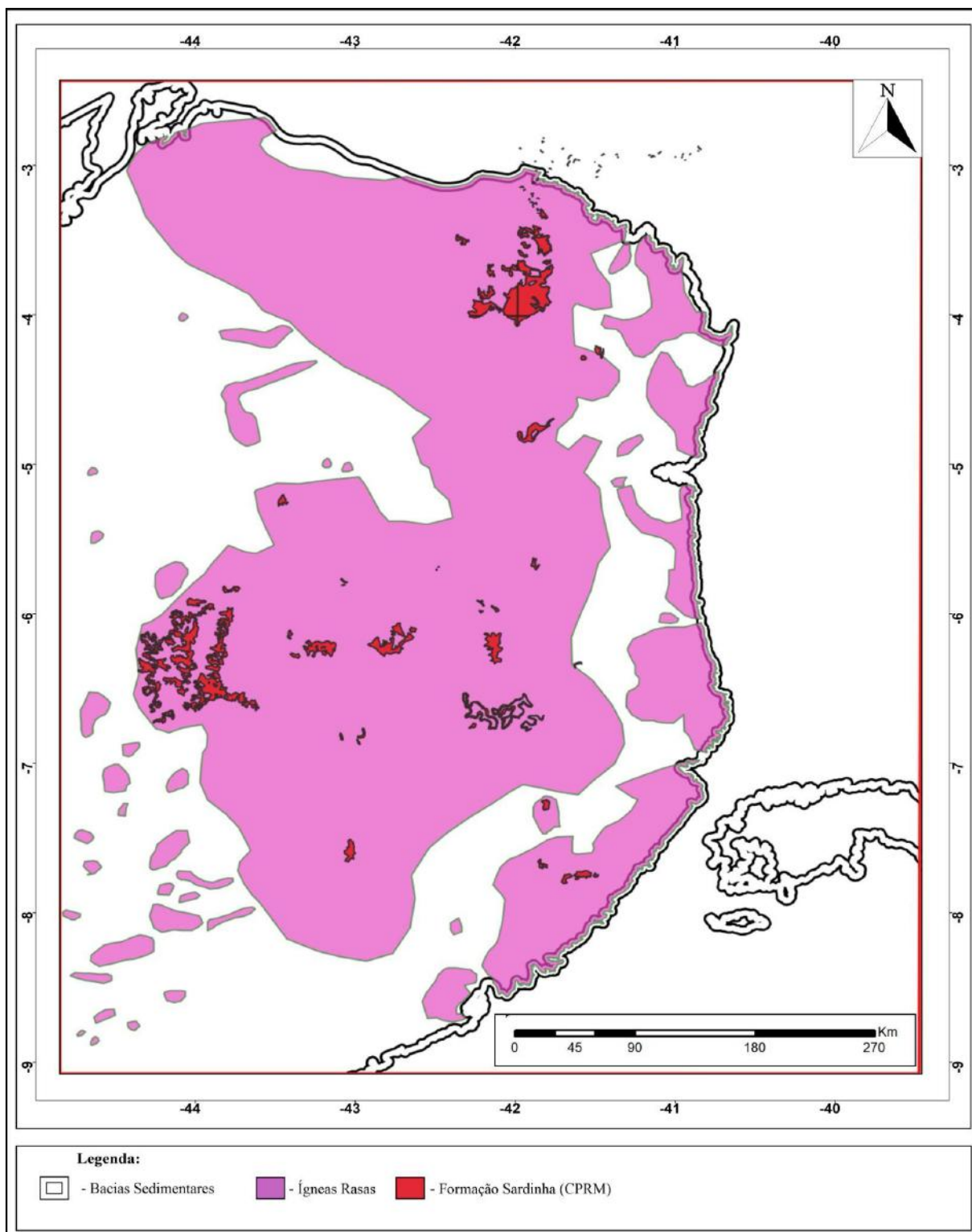


Figura 27: Mapa de distribuição de ígneas rasas em subsuperfície, adicionada a Formação Sardinha aflorante, mapeada pela CPRM.

MOCITAIBA *et al.* (2017) publicaram seu mapeamento das ígneas da Bacia do Parnaíba (Figura 28). Essa pesquisa também utilizou-se dos métodos potenciais magnéticos para identificar os corpos das formações Sardinha e Mosquito. É visível que o mapa gerado acima e o publicado pelos autores citados neste parágrafo compartilham de semelhanças na forma da área delimitada.

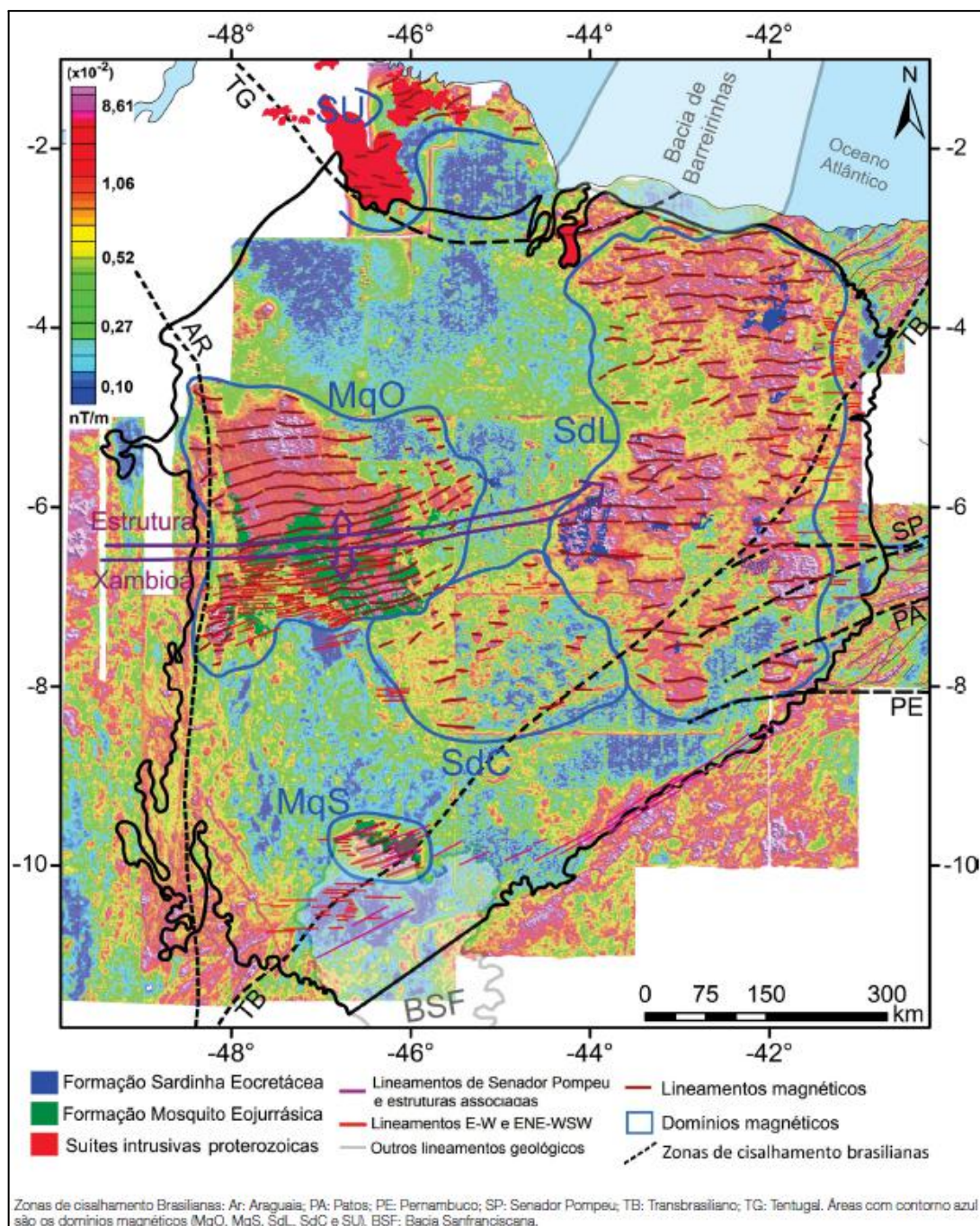


Figura 28: Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) com a localização das suítes intrusivas proterozoicas no Cráton São Luís e das formações Mosquito e Sardinha na Bacia do Parnaíba. Fonte: (MOCITAIBA *et al.*, 2017).

6.2. LINEAMENTOS ESTRUTURAIS

Outra finalidade deste trabalho consiste em identificar e interpretar as feições estruturais da Província Borborema e do embasamento das bacias Parnaíba e Araripe. Primeiro, foi preciso segmentar as regiões da Província Borborema. Os domínios foram divididos de acordo com BRITO NEVES *et al.* (2000): Médio Coreaú; Ceará Central; Rio Grande do Norte; Transversal; Sul;. Em seguida, foram identificadas, através do Mapa ISA, as principais zonas de cisalhamento da região, bem como toda feição estrutural na escala de 1:1.000.000. (Figura 29)

Após esta etapa, iniciou-se a interpretação da região abaixo dos sedimentos da Bacia do Parnaíba. Onde foram prolongadas as principais zonas de cisalhamento, assim como os domínios proterozoicos da Província Borborema (Figura 30). Normalmente, por se tratar de um embasamento profundo e com um pacote sedimentar com cerca de 4 km de espessura por cima, os dados não possuem a mesma qualidade do que a apresentada na Província Borborema. Por conta disso, foi difícil acompanhar certos lineamentos, assim como identificar se os mesmos prosseguiram através do Lineamento Transbrasiliano. Porém, com o filtro ISA e o sombreamento a 135°, foi possível eliminar as dificuldades e definir o local de encontro das principais zonas de cisalhamento com o Transbrasiliano. Além do auxílio do *Matched Filtering* no filtro ASA (Figura 13) no mapeamento das ígneas rasas, ele ,em conjunto com o filtro ISA, também ajudou a observar que as feições que atravessam o transbrasiliano aparentam ser de origem ígnea, como soleiras.

A pesquisa em que os prolongamentos das principais zonas de cisalhamento mais se aproximam com os deste trabalho é a de GANADE *et al.* (2021) (Figura 31). As interpretações dos demais autores citados neste estudo tendem a prolongar essas zonas de cisalhamento muito mais a sul do que o identificado.

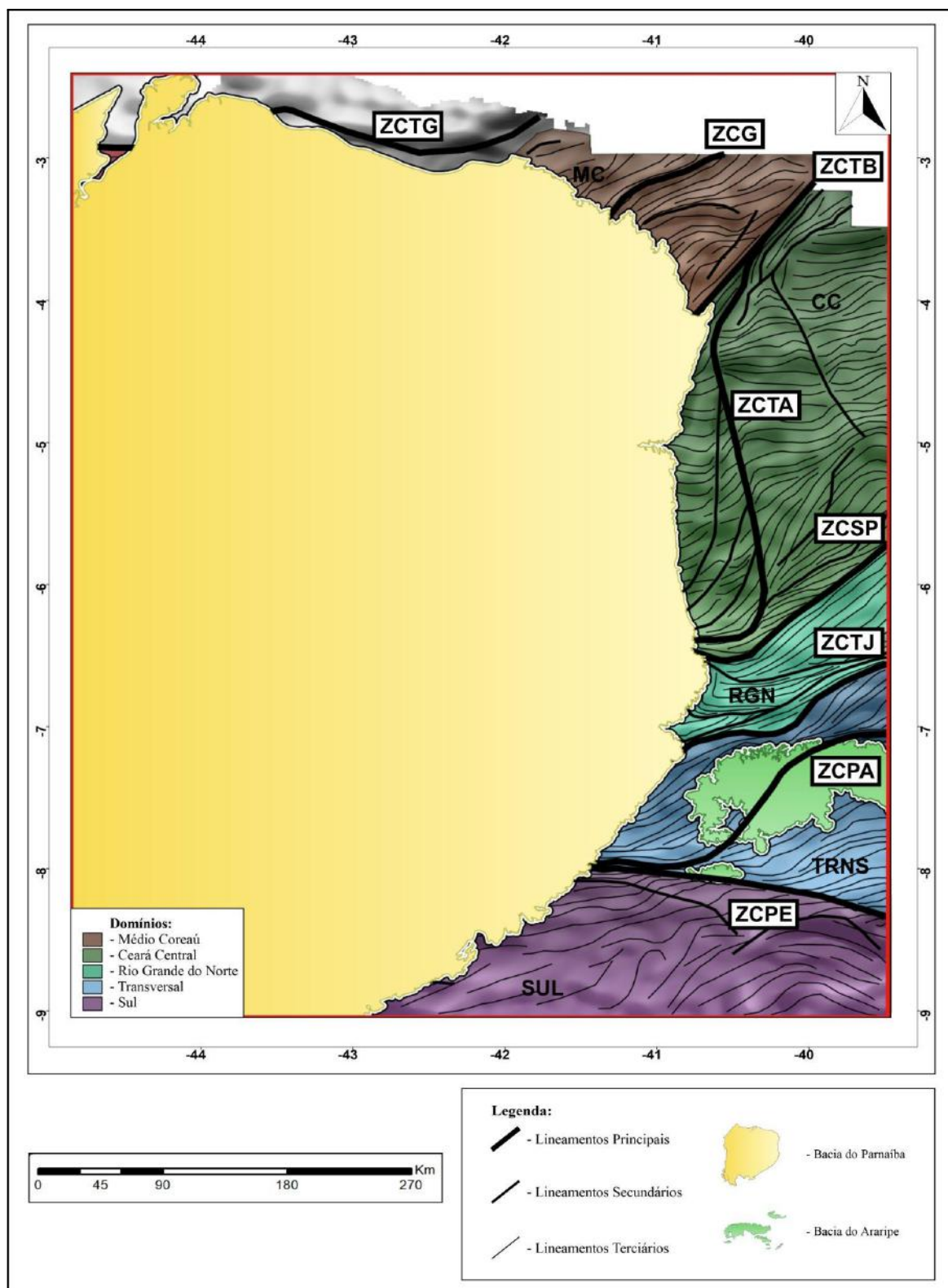


Figura 29: Mapa de interpretação das feições estruturais da Província Borborema divididas nos domínios geotectônicos. Ao fundo o sombreado do mapa ISA. (ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliiano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;

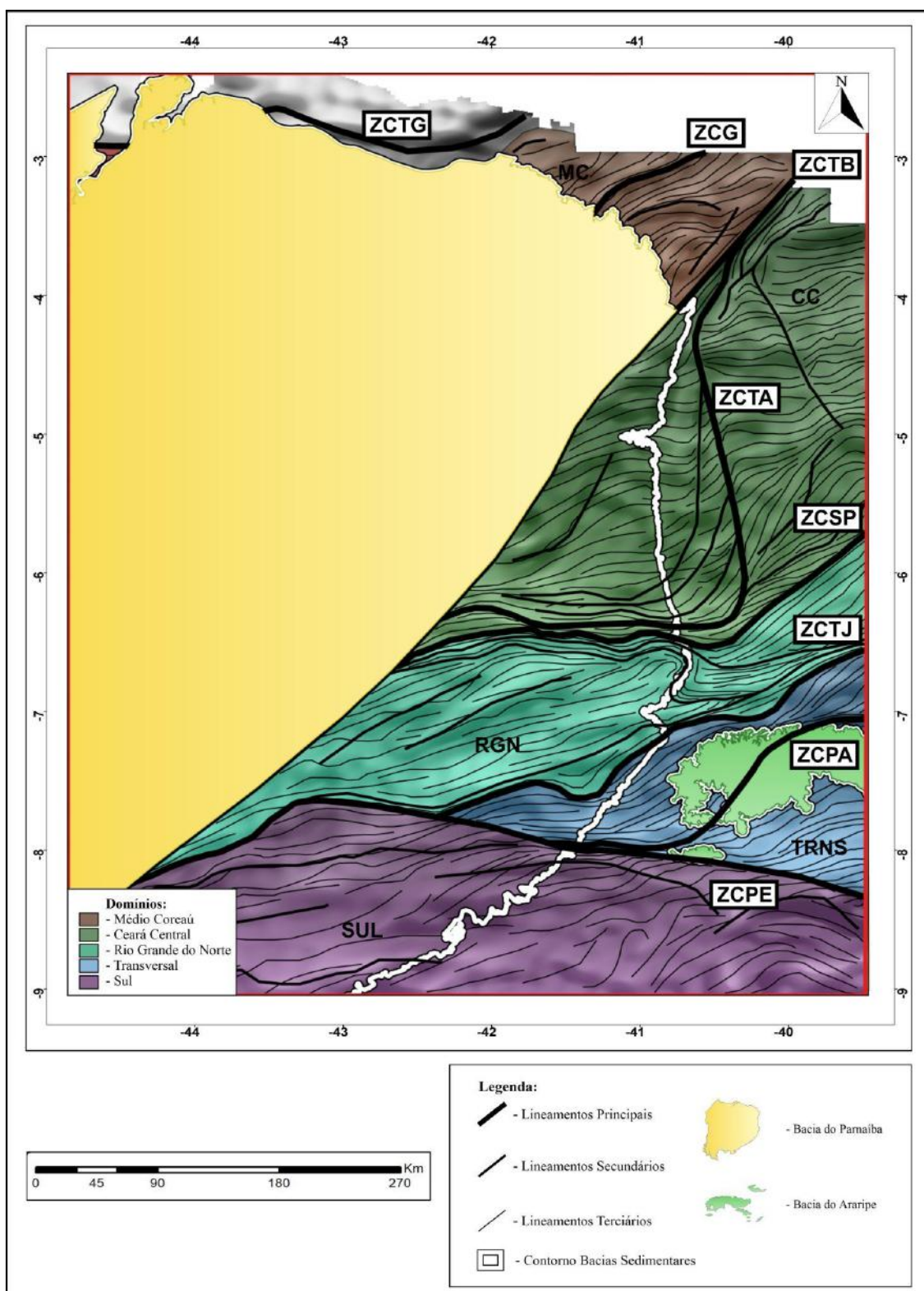


Figura 30: Mapa de interpretação das feições estruturais da Província Borborema divididas nos domínios geotectônicos por debaixo da Bacia do Parnaíba. Ao fundo o sombreamento do mapa ISA. (ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliiano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;

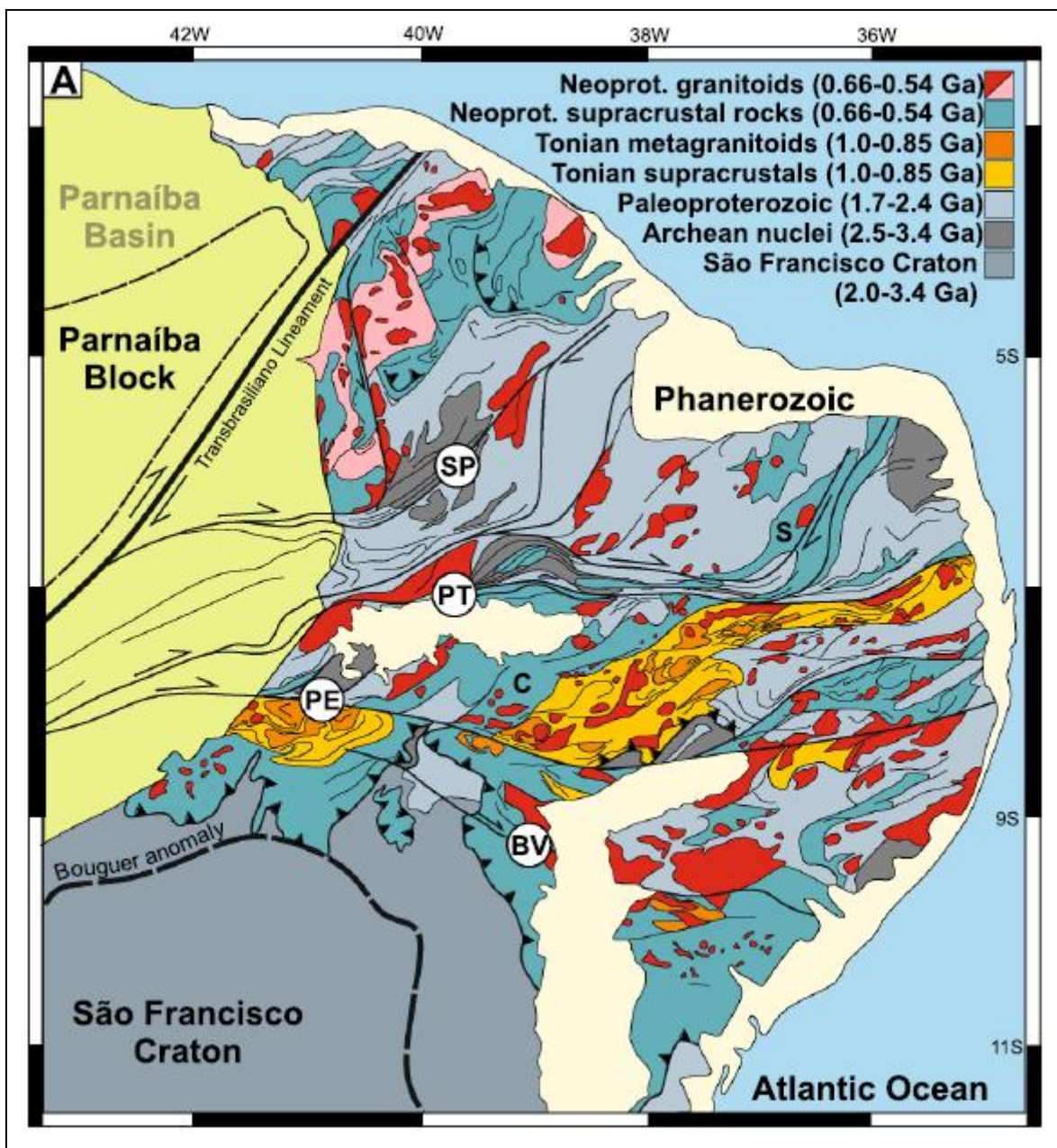


Figura 31: Mapa geológico, em inglês, interpretado da Província Borborema. As abreviações correspondem aos nomes das zonas de cisalhamento. SP - Senador Pompeu; PT - Patos shear zone; PE - Pernambuco; BV - Boa Vista; C - Cinturão Cachoeirinha; S - Cinturão Seridó. Fonte: (GANADE *et al.*, 2021) – Figura em Inglês.

Definido o prolongamento dos domínios por debaixo da Bacia do Parnaíba, restaram as identificações dos terrenos crustais a oeste do Lineamento Transbrasiliano. Para isso, foram analisados os filtro TMI e ISA em conjunto com o recente trabalho de PORTO *et al.* (2022), que segmentou os blocos crustais da Bacia do Parnaíba através de uma compilação de dados bibliográficos, de métodos potenciais magnéticos e gravimétricos, além de dados sísmicos (Figura 32). Em seguida, foi elaborado o mapa com os terrenos crustais a oeste do

Transbrasiliano, onde as feições interpretadas concordam bastante com o que foi proposto pela autora citada acima (Figura 33). A única exceção foi o limite entre os domínios Médio Coreau, Barra do Corda e Gurupí, onde o primeiro, na interpretação deste trabalho, possui uma continuidade para oeste, por conta da análise estrutural.

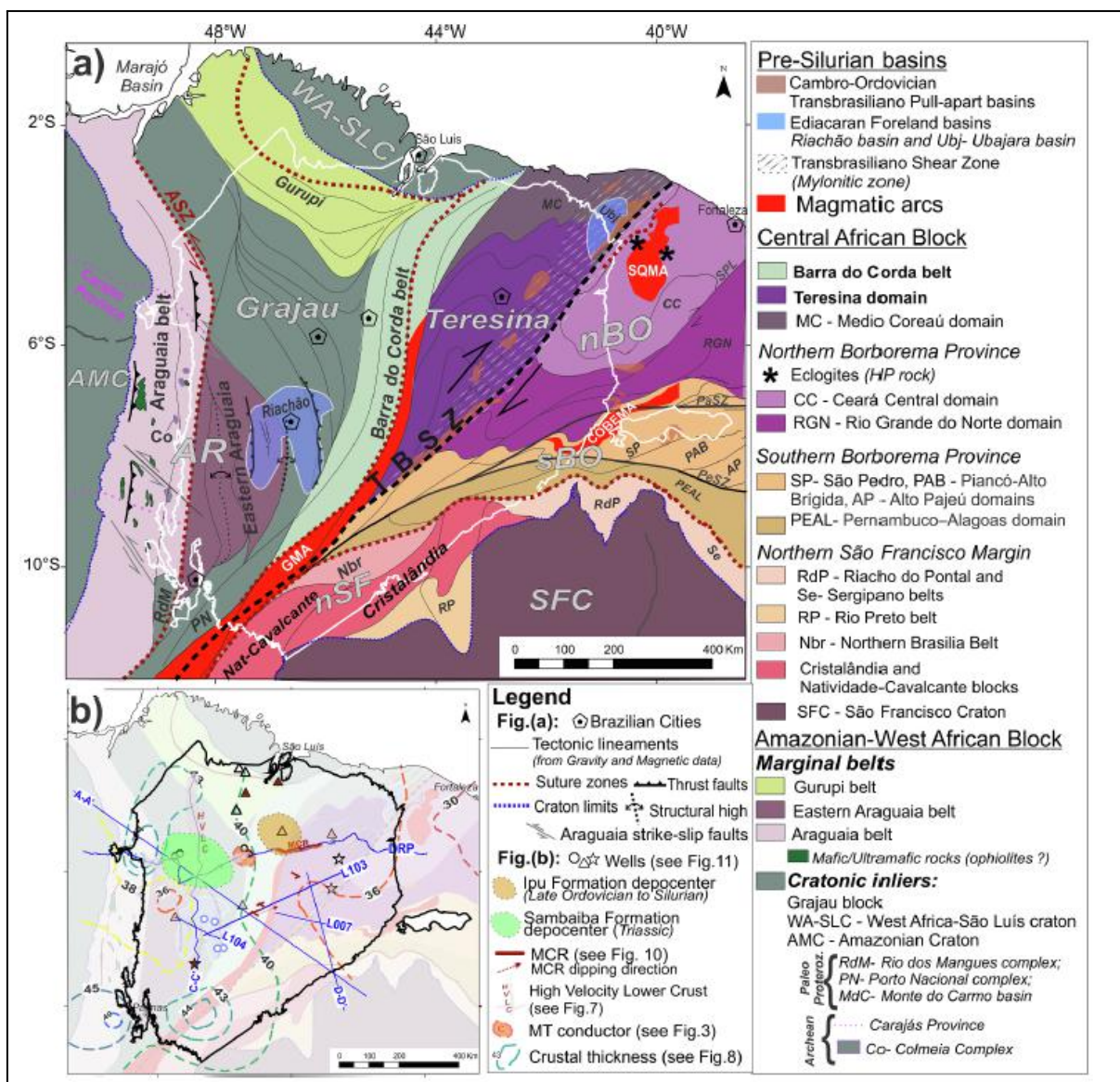


Figura 32: Imagem de língua inglesa: (a) - Proposta de mapa paleotectônico do embasamento pré-siluriano da Bacia do Parnaíba e áreas adjacentes; (b) - Mapa de suporte com as principais características observadas em a compilação de dados aqui apresentada, incluindo a localização dos depocentros backstripped de Ipu (Ordoviciano tardio a Siluriano) e Sambaíba (Triássico) formações da Bacia do Parnaíba. Fonte: (PORTO *et al.*, 2022) – Figura em Inglês.

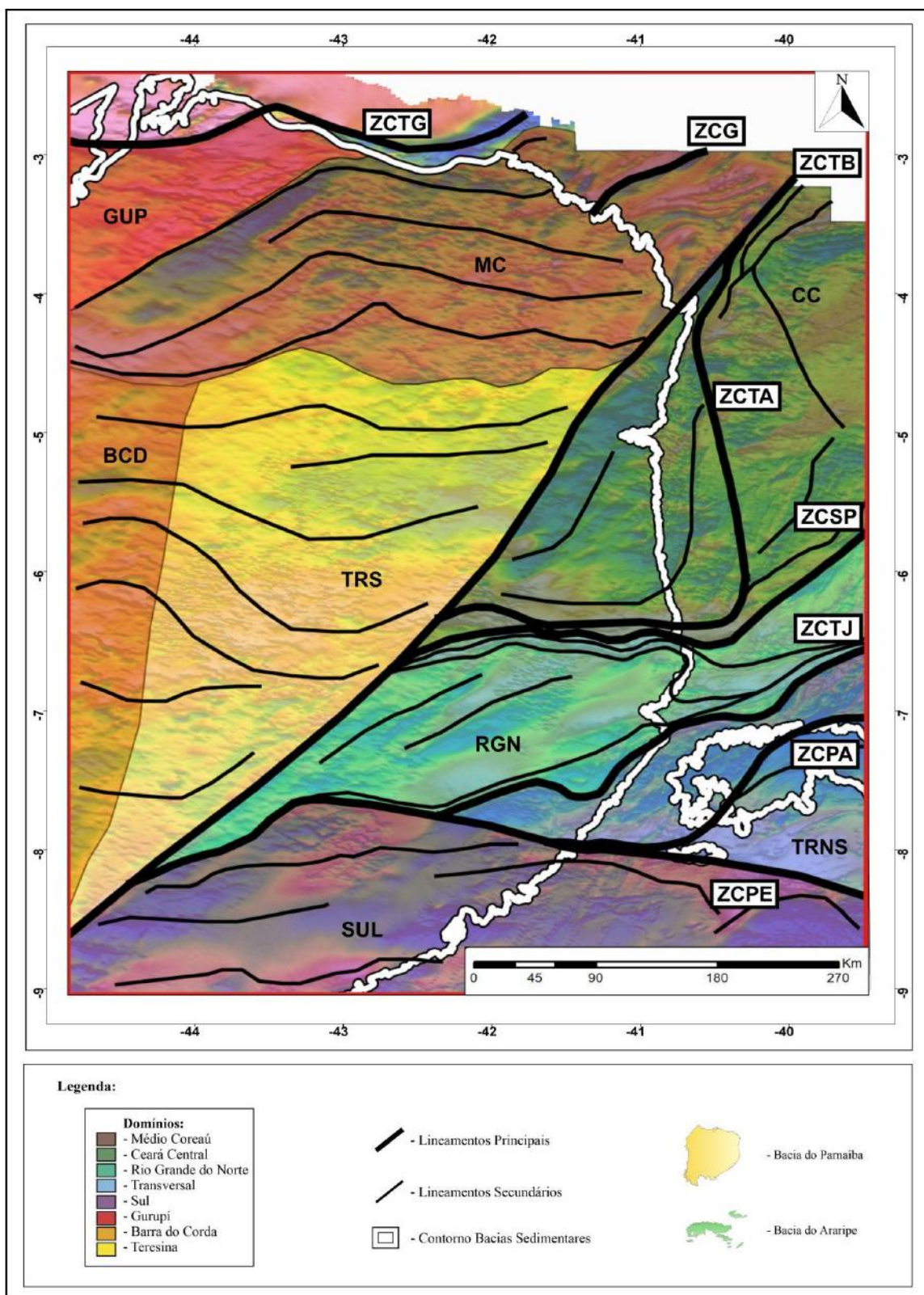


Figura 33: Mapa TMI com interpretação dos terrenos crustais a oeste do Transbrasiliano e domínios contínuos da Província Borborema por debaixo da Bacia do Parnaíba. (ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;.

No presente trabalho, foram identificados trends E-W na maioria dos mapas apresentados, tanto nas feições dúcteis quanto nas rúpteis. No Mapa GX, os lineamentos rúpteis interpretados apresentaram orientações NE-SW e NW-SE. Estes podem ser vinculados aos lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês, respectivamente. Segundo CUNHA (1986), o Lineamento Picos-Santa Inês forma uma zona cataclástica de tendência NW-SE. Esta zona reflete a morfologia atual, que produz alinhamentos de tendência NW. Já o Transbrasiliano é uma megaestrutura com mais de 5.000 km, que na Bacia do Parnaíba possui orientação NE. Do Paleozoico ao Carbonífero, os lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês atuaram como eixos deposicionais na bacia. RIENTE *et al.* (2022) identificaram lineamentos de direções E-W e NE-SW na trama do embasamento da Bacia do Parnaíba. Assim como feições de orientação NE-SW e NW-SE nas imagens SRTM das formações aflorantes da bacia. Tais conclusões dão suporte aos dados obtidos no presente estudo.

Após toda a divisão da área estudada em domínios definidos, foram elaboradas rosetas, dos lineamentos dúcteis, para cada grupo (Figura 34). Onde foi observado uma semelhança entre todos os domínios e uma tendência ENE, com a média de 069° . Esta orientação média é principalmente influenciada pelas fraturas E-W e ENE-WSW, geradas na abertura do Atlântico Central (RIENTE *et al.*, 2022), e da atividade tectônica da Orogênese Brasileira, onde as zonas de cisalhamento possuem majoritariamente orientação NE-SW ou E-W, principalmente o Transbrasiliano, que exerce maior influência na trama estrutural do embasamento.

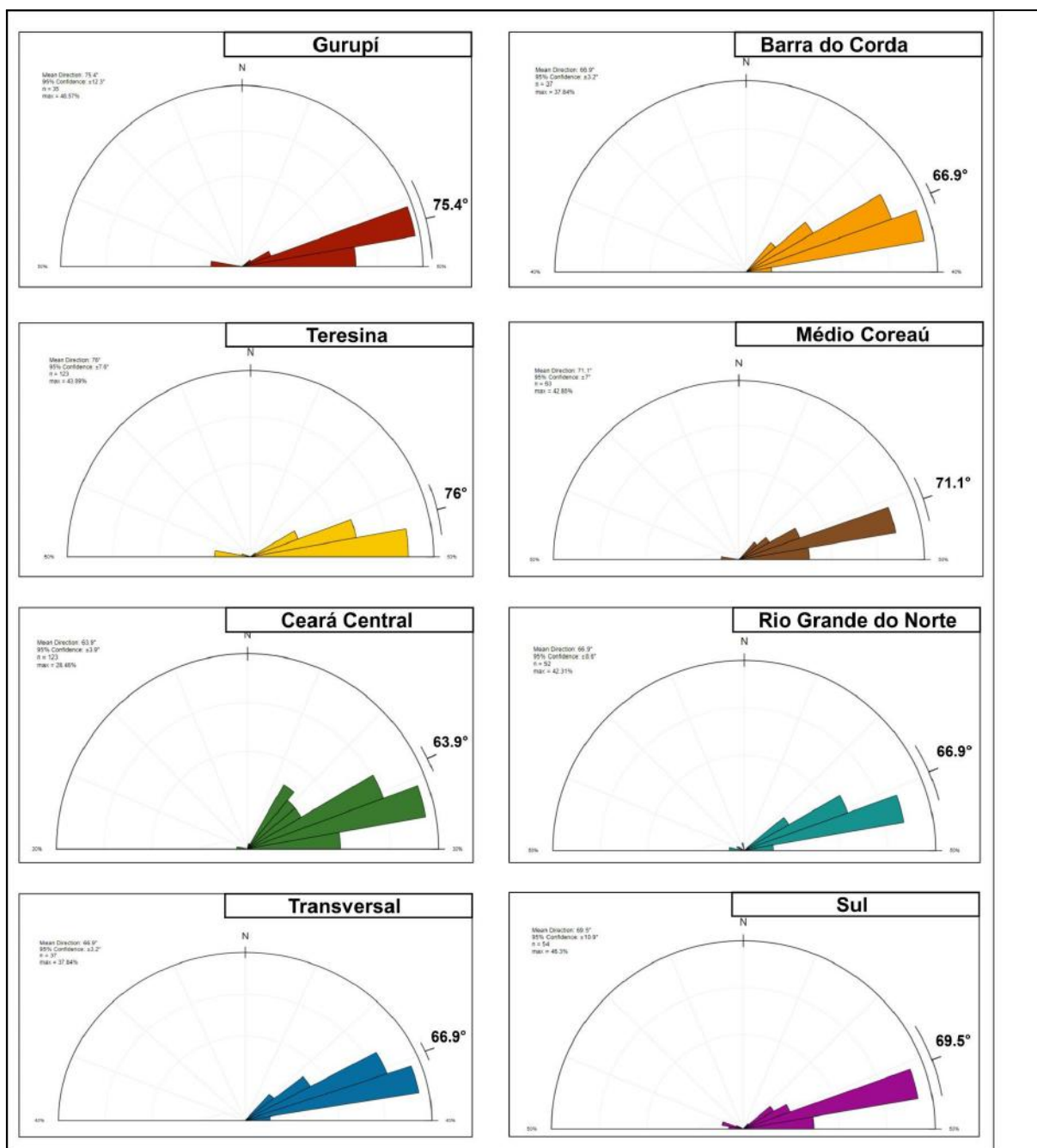


Figura 34: Rosetas dos lineamentos de cada domínio interpretado.

Por fim, foi elaborado o mapa final com os domínios definidos e a interpretação estrutural da área de estudo, que aborda o setor oeste da Província Borborema e leste da Bacia do Parnaíba (Figura 35).

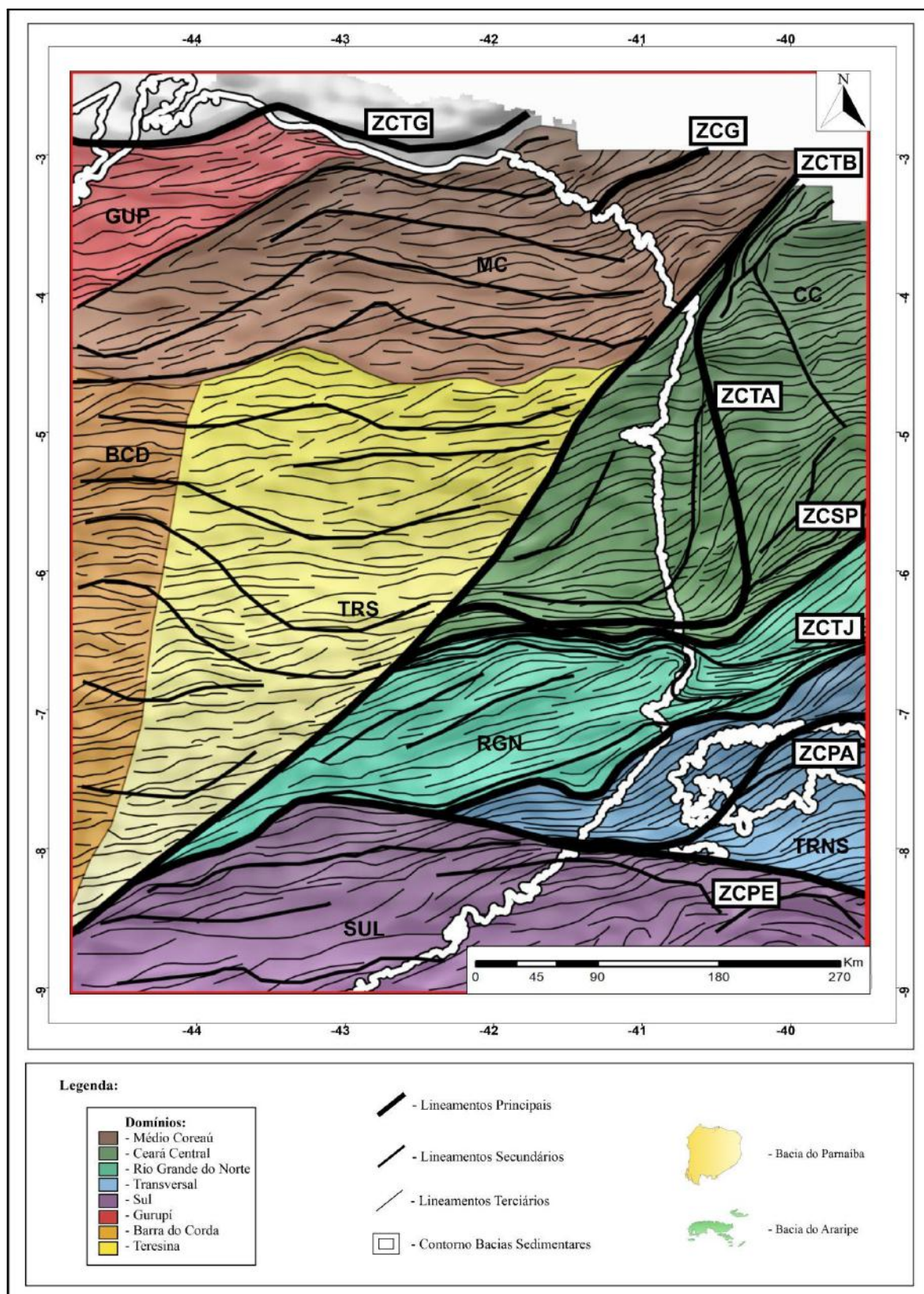


Figura 35: Mapa da interpretação das feições estruturais e seus domínios.(ZCTG) - Zona de Cisalhamento Tentugal; (ZCG) - Zona de Cisalhamento Granja; (ZCTB) - Zona de Cisalhamento Transbrasiliiano; (ZCTA) - Zona de Cisalhamento Tauá; (ZCSP) - Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; (ZCTJ) - Zona de Cisalhamento Tatajuba; (ZCPA) - Zona de Cisalhamento Patos; (ZCPE) - Zona de Cisalhamento Pernambuco;.

7. CONCLUSÕES

A composição básica das intrusões magmáticas da Bacia do Parnaíba apresentaram grande contraste com o pacote sedimentar. O filtro ASA foi, sem dúvidas, essencial para o mapeamento da distribuição das formações ígneas em subsuperfície. Esta pesquisa comprovou que a profundidade dos pacotes ígneos é mais importante que sua espessura. A técnica *Matched Filtering* possibilitou a separação dos sinais em diferentes profundidades, auxiliando o mapeamento das ígneas rasas no interior da bacia. As rochas máficas dos diques presentes na Província Borborema foram bem ressaltadas pelo filtro ASA. Contudo, dados radiométricos seriam bem-vindos para a identificação de novos diques e a prolongação dos mesmos.

Existe uma forte interferência E-W nas anomalias localizadas no interior da bacia. Isso acontece pela presença das rochas ígneas, que ao intrudirem, acomodaram-se em fraturas com esta mesma orientação. Como estas rochas possuem altos valores de susceptibilidade magnética, é normal que feições com outras orientações sejam mascaradas. Portanto, o filtro GX fez o papel de desmascarar essas feições, e realçar as estruturas rúpteis de *trend* NE-SW e NW-SE, que podem ser relacionados com os eixos deposicionais iniciais da bacia, que foram o Transbrasiliano e o Pico-Santa Inês.

A aplicação da equação de valor agregado (Equação 4), em junção com as imagens de krigagem, apresentou-se muito eficaz para o entendimento das relações entre as anomalias magnéticas e as condições de espessura e profundidade. Auxiliou também na caracterização do contraste das regiões onde ocorrem ígneas mais rasas e mais profundas. Isto evidenciou que, na área estudada, estas rochas encontram-se mais profundas no setor NW e mais rasas no setor central.

O filtro ISA, por transmitir as anomalias profundas quase no mesmo nível que as rasas, foi fundamental para a interpretação da trama crustal da Bacia do Parnaíba, além de confirmar a continuidade das feições estruturais da Província Borborema. Ficaram claras as continuidades das principais zonas de cisalhamento da província por debaixo da Bacia do Parnaíba. Inclusive, com o encontro de algumas delas com o Lineamento Transbrasiliano. A forte demarcação da Zona de Cisalhamento do Transbrasiliano nos mostrou a diferença nos terrenos crustais do lado esquerdo e do lado direito.

A interpretação das feições estruturais dúcteis, no interior da bacia, nos permitiu fazer as divisões dos domínios geotectônicos. As anomalias mais evidentes mostraram fortes

indícios dos limites espaciais das faixas proterozoicas do Gurupí e, da parte sob a bacia, do Domínio Médio Coreaú. As rosetas geradas indicaram uma tendência ENE na trama crustal da área de estudo. Trama esta que foi muito influenciada pelos processos tectônicos da Orogênese Brasileira e pela tectônica jurássica do processo de separação do Gondwana e formação do Oceano Atlântico.

Podemos concluir que os dados catalogados dos poços e seus resultados de krigagem auxiliaram no entendimento da distribuição das ígneas presentes na Bacia do Parnaíba. Contudo, é perceptível que os poços tendem a se acumular na região noroeste da área de estudo. Esta distribuição ocorre por conta do interesse econômico nas formações com potencial de extração de óleo e gás, visto que estas formações estão localizadas no setor noroeste da bacia. Novos poços, com distribuição mais ampla, serão essenciais para a evolução do estudo na área.

A integração dos dados geofísicos ocasionou interferências e ruídos pontuais. Considerando que as menores resoluções encontram-se na borda leste da Bacia do Parnaíba, novos levantamentos aerogeofísicos, de alta resolução, que abrangem toda a área da bacia, poderiam trazer novas descobertas a respeito da divisão crustal do seu embasamento.

8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, 7: 349-364, 1977.

BRITO NEVES, B.B. O mapa geológico do nordeste oriental do Brasil. Escala 1/1.000.000. **Livre Docência Thesis, Departamento de Geologia Geral, Universidade de São Paulo**, São Paulo, SP, Brasil, 177p, 1983.

BRITO NEVES, B. B. *et al.* Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: A case of tectonic heritage. **Journal of Geodynamics**, v. 1, n. 3–5, p. 495–510, 1 dez. 1984.

BRITO NEVES, B. B. de; *et al.* Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. **Tectonic Evolution of South America**. 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro, Brazil. V. 1, p. 151-182, 2000.

CORDANI, U. G. *et al.* The position of the Amazonian Craton in supercontinents. **Gondwana Research**, v. 15, n. 3–4, p. 396–407, 1 jun. 2009.

CORDANI, U. G.; SATO, K. Crustal evolution of the South American Platform, based on Nd isotopic systematics on granitoid rocks. **Episodes Journal of International Geoscience**, v. 22, n. 3, p. 167–173, 1 set. 1999.

CORDANI, Umberto G. *et al.* Estudo preliminar de integração do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. **Ciência. Técnica. Petróleo. Seção: exploração de petróleo**, n. 14p. 1-70, 1984.

COWAN, D. R.; COWAN, S. Separation filtering applied to aeromagnetic data. **Exploration Geophysics**, v. 24, n. 3-4, p. 429-436, 1993.

CUNHA, F.M.B. **Evolução Paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu Arcabouço Tectônico**. Rio de Janeiro. 107 p. (Dissertação de Mestrado, UFRJ), 1986.

DALY, M. C. *et al.* Brasiliano crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: Results of a deep seismic reflection profile. **Tectonics**, v. 33, n. 11, p. 2102–2120, 1 nov. 2014.

DANTAS, A. J. S. **Mapeamento da isoterma de Curie na Bacia do Parnaíba estimada através da profundidade da base das fontes magnéticas**. 22 maio 2014.

DE CASTRO, D. L. *et al.* Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 128–145, 18 fev. 2014.

DE CASTRO, D. L. *et al.* Geostatistical Interplay Between Geophysical and Geochemical Data: Mapping Litho-Structural Assemblages of Mesozoic Igneous Activities in the Parnaíba Basin (NE Brazil). **Surveys in Geophysics**, v. 39, n. 4, p. 683–713, 1 jul. 2018.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. Geophysics for the mineral exploration geoscientist. **Cambridge University Press**, 2014.

EBERT, H.; CLARO, R. The Precambrian geology of the “Borborema”-Belt (States of Paraíba and Rio Grande do Norte; northeastern Brazil) and the origin of its mineral provinces. **Geologische Rundschau** 1969 **59:3**, v. 59, n. 3, p. 1292–1326, 1 jul. 1970.

EGYDIO-SILVA, M.; VAUCHEZ, A. Cisalhamento de uma crosta parcialmente fundida: o falhamento de Pernambuco-Oeste (NE-Brasil). **Boletim de Resumos Expandidos-Sesseos Tematicas**, v. 2, p. 375-376, 1992.

FENG, Y. *et al.* An Improved Aeromagnetic Compensation Method Robust to Geomagnetic Gradient. **Applied Science**. 2022.

FERNANDES, L. B. de M. *et al.* Structural controls and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological data of basic dike swarms in the eastern domain of the Parnaíba Basin, northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 101, p. 102601, 2020.

FERREIRA, F. J. F. *et al.*. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. **Parte I - Aplicação a dados sintéticos**. 1-6. 2010.

GAMA JÚNIOR, T.; Geologia do setor nordeste da zona de cisalhamento de Granja - noroeste do Ceará. **Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará**, Belém, 1992.

GANADE, C. E. *et al.* Decratonization by rifting enables orogenic reworking and transcurrent dispersal of old terranes in NE Brazil. **Scientific Reports** 2021 **11:1**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 11 mar. 2021.

GOOVAERST, P. Geostatistics for natural resources evaluation. **New York: Oxford University Press**, 1997.

HARTMANN, Gelvam Andre. **Arqueomagnetismo no Brasil: variações da intensidade do campo magnético terrestre nos últimos cinco séculos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2010.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. Geological interpretation of aeromagnetic data. **Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists**, 2013.

JARDIM DE SÁ, E.F. 1984. A evolução proterozóica da Província Borborema. In: **SIMPÓSIO GEOLOGIA NORDESTE**, 11, Natal, 1984. Atas...Natal, **SBG/NE**, 297-316.

KEAREY, P. *et al.* Geofísica de exploração. **Editora Oficina de textos**, 2009. 438p.

KLEIN, E. L. *et al.* The Gurupi Belt, northern Brazil: Lithostratigraphy, geochronology, and geodynamic evolution. **Precambrian Research**, v. 141, n. 3–4, p. 83–105, 20 nov. 2005.

MICHAUD, André. Sobre la ley de lo inverso del cubo y los monopolos magnéticos. **The General Science Journal**. 2013

MILLER, H. G.; SINGH, V. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. **Journal of Applied Geophysics**, v. 32, n. 2–3, p. 213–217, 1 ago. 1994.

MOCITAIBA, L. DA S. R.; DE CASTRO, D. L. Mapeamento de rochas ígneas na borda oeste da Bacia do Parnaíba. **Global Meeting Abstracts**, p. 729–734, 6 ago. 2015.

MOCITAIBA, L. S. R. *et al.* Cartografia geofísica regional do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba. **Geologia USP. Série Científica**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 169-192, 2017.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440276>, v. 37, n. 3, p. 507–517, 7 fev. 2012.

NEVES, S. P.; MARIANO, G. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: the Pernambuco lineament, northeastern Brazil. **Journal of Structural Geology**, v. 21, n. 10, p. 1369–1383, 1 out. 1999.

OLIVEIRA, R. G.; MEDEIROS, W. E. Deep crustal framework of the Borborema Province, NE Brazil, derived from gravity and magnetic data. **Precambrian Research**, v. 315, p. 45–65, 1 set. 2018.

PESSANO, P. C. *et al.* Updated map of the mafic dike swarms of Brazil based on airborne geophysical data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 107, p. 103076, 1 abr. 2021.

PORTO, A. *et al.* The Neoproterozoic basement of the Parnaíba Basin (NE Brazil) from combined geophysical-geological analysis: A missing piece of the western Gondwana puzzle. **Precambrian Research**, v. 379, p. 106784, 1 set. 2022.

RIBEIRO, V. B. *et al.* Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. **Terra e Didática**, v. 10, n. 1, p. 29-51, 2014.

RIENTE, U.. **ANÁLISE ESTRUTURAL DA REGIÃO ENTRE AS BACIAS DO PARNAÍBA E DO ARARIPE – INVESTIGANDO CONEXÕES GEOLÓGICAS**. 2022. xii, 73 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SZATMARI, PETER *et al.* Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. **Revista brasileira de Geociências**, v. 17, n. 2, p. 180-188, 1987.

VAUCHEZ, A. *et al.* The Borborema shear zone system, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, n. 3–4, p. 247–266, 1 jul. 1995.

VAZ P.T. *et al.* Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, 15(2):253-263. 2007.

YAMAGUTI, H.S. **Mineralização aurífera de Montes Áureos (Maranhão): rochas hospedeiras, controles deposicionais e fluidos mineralizantes**. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Tese de Mestrado, 79 p. 2000.

ZACCHI, E. N. M. **Integração de dados aerogeofísicos, estruturais e geoquímicos para a caracterização de formações ferríferas bandadas na região de Itapanhoacanga MG**. 2011, x, 97 f., il. Dissertação (Mestrado em Geologia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

ZALÁN, P. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. **Geologia Do Continente Sul-americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 595–612, 1 jan. 2004.