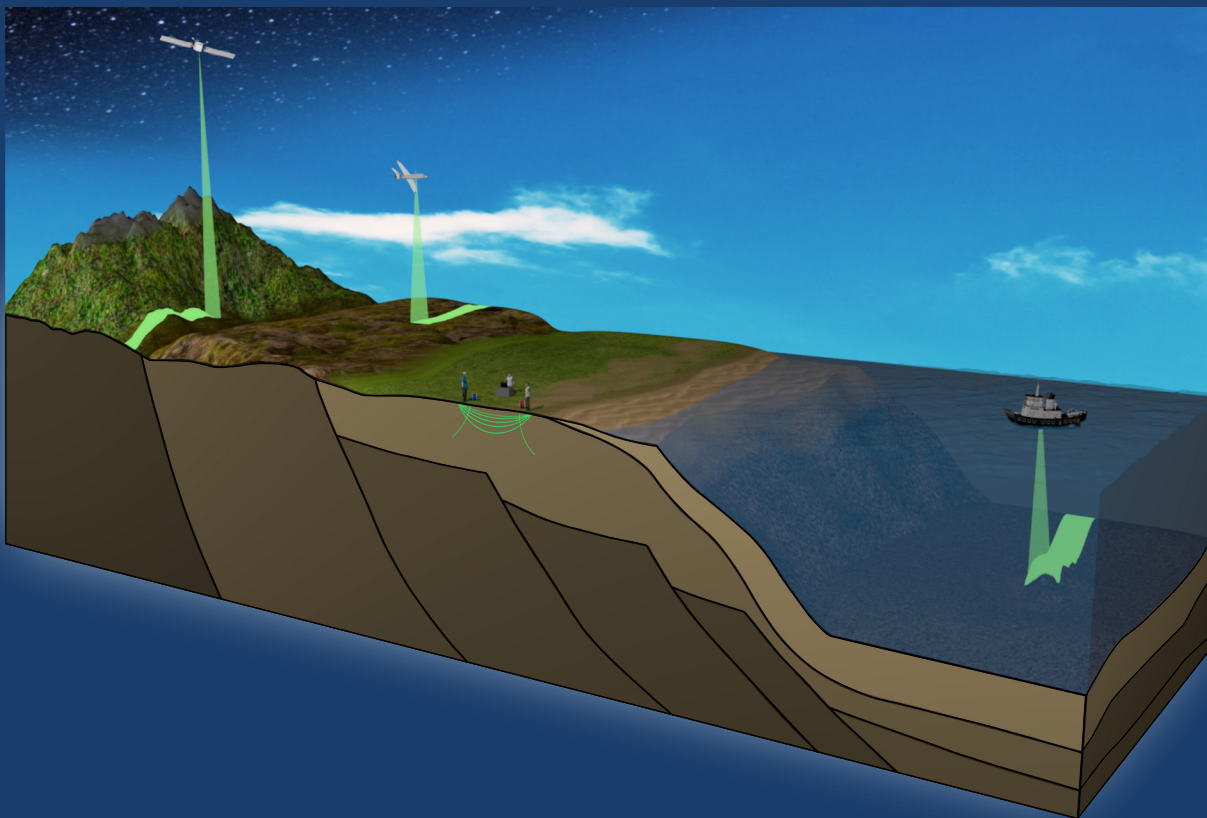


INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA Nº10



ESTUDOS GEOFÍSICO-GEOLÓGICOS EM BORDA DE BACIAS SEDIMENTARES TERRESTRES BRASILEIRAS – ÁREA PILOTO: BORDA OESTE DA BACIA DO PARNAÍBA



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Vitor Eduardo de Almeida Saback

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM)

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente

Inácio Cavalcante Melo Neto

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Francisco Valdir Silveira

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Geologia

Marcelo Esteves Almeida

Chefe da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Iago Sousa Lima Costa

Chefe da Divisão de Geoquímica

Daliane Bandeira Eberhard

Chefe da Divisão de Geologia Básica

Patrick Araújo dos Santos

Chefe do Departamento de Informações Institucionais

Edgar Shinzato

Chefe da Divisão de Documentação Técnica

Roberta Pereira da Silva de Paula

Chefe do Departamento de Relações Institucionais e Divulgação

Patrícia Düringer Jacques

Chefe do Núcleo de Comunicação

Heber Vieira de Oliveira

Chefe da Divisão de Editoração Geral

Hemilton Moraes Cunha

SEDE – Brasília

Responsável Técnico do Produto

Diogo Alves de Sordi

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS
PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS
E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL

ESTUDOS GEOFÍSICO-GEOLÓGICOS EM
BORDA DE BACIAS SEDIMENTARES
TERRESTRES BRASILEIRAS – ÁREA-PILOTO:
BORDA OESTE DA BACIA DO PARNAÍBA

AUTORES

Diogo Alves De Sordi
Alexandre Lago
Hugo Leonardo de Andrade Rocha
Vicente de Paula Pinto
João Batista de Freitas (in memoriam)

INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA
Nº 10



BRASÍLIA
2023

REALIZAÇÃO
SEDE - Brasília

COORDENADOR DO PROJETO
Diogo Alves de Sordi

COMPATIBILIZAÇÃO E REVISÃO GERAL
Luiz Gustavo Rodrigues Pinto
Alexandre Lisboa Lago

CRÉDITOS AUTORAIS
Diogo Alves De Sordi
Alexandre Lisboa Lago
Hugo Leonardo de Andrade Rocha
Vicente de Paula Pinto
João Batista de Freitas (In Memoriam)

APOIO TÉCNICO

REVISÃO ORTOGRÁFICA
Irinéa Barbosa da Silva

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA
Margareth Lopes Moraes

PROJETO GRÁFICO/EDITORIAÇÃO

Capa
DIEDIG

Miolo (DIEDIG)
Agmar Alves Lopes

Diagramação (DIEDIG)
Pedro da Silva

Serviço Geológico do Brasil – CPRM

www.cprm.gov.br
seus@cprm.gov.br

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

E82 Estudos geofísico-geológicos em borda de bacias sedimentares terrestres brasileiras – área piloto : borda oeste da bacia do Parnaíba / Diogo Alves de Sordi ... [et al.]. – Brasília : CPRM, 2023.
1 recurso eletrônico : PDF. – (Informe de geofísica aplicada ; 10)

Levantamentos geológicos e integração geológica regional.
ISBN 978-65-5664-419-6

1. Geofísica – Brasil. 2. Bacias sedimentares – Brasil. I. SORDI, Diogo Alves de. II. LAGO, Alexandre. III. ROCHA, Hugo Leonardo de Andrade. IV. PINTO, Vicente de Paula. V. FREITAS, João Batista de. VI. Título. VII. Série.

CDD 550.981

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Teresa Rosenhayme CRB/7 5662

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM
Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte.

APRESENTAÇÃO

Os estudos geológico-geofísicos em bordas de bacias sedimentares têm como finalidade principal focar, de forma sistemática, os contextos geológicos em ambientes de transição entre as bacias sedimentares e o embasamento cristalino, além de fornecer e adicionar informações que contribuirão para o conhecimento e compreensão das potencialidades petrolíferas, minerais, hídricas e ambientais. Os trabalhos executados consistiram, inicialmente, na interpretação de dados geofísicos sísmicos e não sísmicos (magnéticos, gravimétricos e radiométricos), com a integração de informações geológicas pré-existentes, incluindo informações como perfil de poço e sensores remotos disponíveis em bases de dados institucionais. Os estudos são desenvolvidos dentro do Acordo de Cooperação Técnico-Científica entre o Serviço Geológico do Brasil – CPRM (SGB-CPRM) e a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), contemplando o apoio técnico e operacional entre as instituições. O projeto teve início em janeiro de 2019, e foi selecionado o limite oeste da Bacia do Parnaíba, como área-piloto.

A Bacia do Parnaíba está situada na região nordeste ocidental do território brasileiro. A área de estudo tem 350 km de largura. Sabe-se que a Faixa Araguaia tem cerca de 150 km de largura. Há de se considerar a parte que abrange o Cráton Amazônico na área de estudo. É dito que 200 km é da borda para o interior da bacia. Muitas estruturas do embasamento rochoso estendem-se para o interior da bacia, sendo de grande importância no conhecimento da evolução sedimentar e tectônica, assim como no condicionamento de depósitos minerais.

A grande quantidade e variedade de dados utilizados no projeto foram extraídos das bases de dados do SGB-CPRM e da ANP, sendo que um dos objetivos é executar o estudo com o menor custo possível, evitando aquisição de novos dados.

Inácio Cavalcante Melo Neto

Diretor-Presidente

Francisco Valdir Silveira

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

HOMENAGEM



GEÓLOGO, JOÃO BATISTA FREITAS DE ANDRADE *(In memoriam)*

É com profundo pesar que dedicamos este Informe de Geofísica Aplicada à memória de João Batista Freitas de Andrade, um geofísico exemplar que dedicou mais de 30 anos ao Serviço Geológico do Brasil.

João Batista, formado geólogo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, ingressou na CPRM em 17/02/1976, contribuindo de maneira significativa em diversas áreas da empresa, como recursos minerais e gestão territorial em diferentes regiões do Brasil.

Ao longo dos últimos 20 anos, João Batista concentrou-se exclusivamente na geofísica, desempenhando um papel fundamental, juntamente com Luís Marcelo Fontoura Mourão e Maria Laura, na retomada dos aerolevantamentos geofísicos na CPRM a partir de 2000.

Sua dedicação foi evidente na fiscalização de projetos aerogeofísicos, destacando-se também em empreendimentos significativos como o de Nova Redenção (BA) e o Projeto Emergencial de Maceió (AL). Além disso, era a pessoa responsável pela solicitação de dados junto à ANP, dentro do acordo de cooperação entre as instituições.

Pessoa culta e educada, João Batista tinha na sua experiência profissional a maior pós-graduação possível. Adorava comparar

suas vivências na Amazônia e tinha duas paixões irrefutáveis: a música e suas duas filhas, Thais e Luiza. Seu apelido de maestro para os íntimos fazia todo o sentido.

A perda de João Batista é imensurável para a família SGB. Este Informe é uma homenagem sentida a um colega que deixou um legado valioso. João Batista, além de sua expertise profissional, era um amigo atencioso, sempre disponível para ajudar seus colegas. Sua partida repentina deixou um vazio em nossos corações, e sua ausência será profundamente sentida.

Que a paixão e dedicação de João Batista inspirem as futuras gerações de geocientistas. Descanse em paz, querido colega.

RESUMO

A Bacia do Parnaíba (BPar) é uma grande sinéclise paleozoica, sustentada por embasamento cristalino pré-cambriano, que compreende estrutura litoestrutural e tectônica complexa formada durante o Neoproterozoico, colagem orogênica Brasileiro–Pan-Africana. A BPar tem seu embasamento constituído por uma série de segmentos crustais, os quais são o resultado do processo de aglutinação do Gondwana Ocidental. A BPar faz limite com a Faixa Araguaia e o Maciço de Goiás e, ao sul, com a Faixa de Dobramentos Brasília.

Os dados processados para execução do projeto foram oriundos de diversas fontes, dentre elas destacam-se as bases de dados do SGB-CPRM, ANP e do Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG). Os tipos de dados que fizeram parte dos estudos foram geofísicos: aeromagnetométricos, aerogamaespectrométricos, gravimétricos, imagens de satélites, sísmicos cedidos pela ClmaGeo e sondagem.

A área de estudo abrange uma extensa região com diferentes tipos de rochas e blocos tectônicos divergentes. A interação desses blocos gerou características únicas e os eventos tectônicos adjacentes influenciaram a formação da Bacia do Parnaíba, apresentando ambientes distintos devido aos estágios de sua formação.

Vários processamentos foram realizados para melhorar a resolução dos produtos aerogeofísicos e integrar os dados. Uma subárea, na parte noroeste do projeto, se mostrou mais interessante para compreender as estruturas internas do embasamento, sendo selecionada por apresentar melhor qualidade e variedade de dados. Na região, usando o processamento Magnetization Vector Inversion (MVI) e a deconvolução de Euler, foram delimitadas estruturas grabeniformes, com profundidade aproximada de 1.200 metros, de modo que a integração dos dados geofísicos possibilitou a identificação de estruturas e corpos com características específicas, auxiliando na cartografia geológica.

Durante o fechamento do Cráton Amazônico, ocorreram movimentos de convergência entre os blocos crustais, resultando em deformações tectônicas e influenciando a distribuição dos depósitos sedimentares na Bacia do Parnaíba e na Faixa Araguaia. Após a fase brasileira, as zonas profundas de cisalhamento foram reativadas como falhas normais, permitindo a formação das estruturas grabeniformes. O Lineamento Transbrasileiro exerceu forte influência na região, controlando a estrutura e a distribuição de intrusões e derrames.

A contribuição das rochas do Cráton Amazônico no assoalho da bacia, por um processo semelhante à subducção, é mostrada, principalmente, pelos lineamentos magnéticos com direção predominante de NW-SE para E-W até NE-SW.

A integração de dados geofísicos em regiões de borda de bacias pode proporcionar uma visão ampliada dos grandes blocos tectônicos e auxiliar no estudo de outras bacias intracratônicas no Brasil.

ABSTRACT

The Parnaíba Basin (BPar) is a large Paleozoic syncline, supported by a pre-Cambrian crystalline basement, which comprises a complex lithostructural and tectonic structure formed during the Neoproterozoic period, as a result of the Brasiliano-Pan-African orogenic collision. The BPar has its basement composed of a series of crustal segments, which are the result of the agglomeration process of Western Gondwana. The BPar also borders the Araguaia Belt and the Goiás Massif, and to the south, it is bounded by the Brasília Fold Belt.

The processed data used for the project came from various sources, including the databases of SGB-CPRM, ANP, and BNDG. The types of data included in these studies were aeromagnetic, aerogamma-spectrometric, gravimetric, satellite images, seismic data provided by CIMAGEO, and drilling data.

The study area encompasses an extensive region with different types of rocks and divergent tectonic blocks. The interaction of these blocks has led to unique characteristics, and the adjacent tectonic events have influenced the formation of the Parnaíba Basin, resulting in distinct environments at different stages of its development. Several processing techniques were applied to improve the resolution of geophysical surveys and integrate the data.

A subarea in the northwest part of the project proved to be more interesting for understanding the internal structures of the basement and was also selected for having better quality and variety of data. Using Magnetization Vector Inversion (MVI) and Euler deconvolution processing, graben-like structures were delineated with an approximate depth of 1200 meters. The integration of geophysical data also facilitated the identification of structures and bodies with specific characteristics, assisting in geological mapping.

During the closure of the Amazonian Craton, convergence movements occurred between the crustal blocks, resulting in tectonic deformations and influencing the distribution of sedimentary deposits in the Parnaíba Basin and the Araguaia Belt. After the Brasiliano phase, deep shear zones were reactivated as normal faults, allowing the formation of graben-like structures. The Transbrasiliano Lineament exerted a strong influence in the region, controlling the structure and distribution of intrusions and volcanic flows.

The contribution of rocks from the Amazonian Craton to the basin floor, through a process similar to subduction, is indicated mainly by magnetic lineaments with a predominant NW-SE to E-W to NE-SW direction. The integration of geophysical data in the border regions of basins can provide a broader understanding of the major tectonic blocks and assist in the study of other intracratonic basins in Brazil.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| SUMÁRIO | 7 |
| 1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 8 |
| 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 9 |
| 2.1. Contexto Geográfico | 9 |
| 2.2. Compartimentação Tectônica | 9 |
| 2.2.1. Os ambientes que limitam a borda oeste da Bacia do Parnaíba | 9 |
| 2.2.2. As rochas da Bacia do Parnaíba | 13 |
| 2.2.3. Contexto do Potencial Geoeconômico | 13 |
| 3. BASE DE DADOS..... | 15 |
| 3.1. Aspectos Gerais sobre as Bases de Dados..... | 15 |
| 3.2. Dados Geofísicos | 15 |
| 3.2.1. Dados Gamaespectrométricos, Magnetométricos e Gravimétricos | 15 |
| 3.2.2. Dados Sísmicos | 15 |
| 3.2.3. Dados de Poços de Exploração..... | 15 |
| 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS MÉTODOS E PROCESSAMENTO DOS DADOS... 18 | |
| 4.1. Magnetometria | 18 |
| 4.1.1. Cálculo da superfície Curie com base em dados potenciais..... | 18 |
| 4.2. Gamaespectrometria | 20 |
| 4.3. Gravimetria | 21 |
| 4.4. Método Sísmico..... | 23 |
| 5. INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS | 24 |
| 6. CONCLUSÕES | 37 |
| REFERÊNCIAS | 38 |

1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região da área de estudo tem aproximadamente 1.200.000 km² e está localizada, em sua maior parte, na Região Norte, englobando os estados do Tocantins e Pará;

na Região Centro-Oeste, o estado do Mato Grosso; e, na Região Nordeste, o estado do Maranhão. Os limites e coordenadas precisas do projeto estão inseridos na Figura 1.

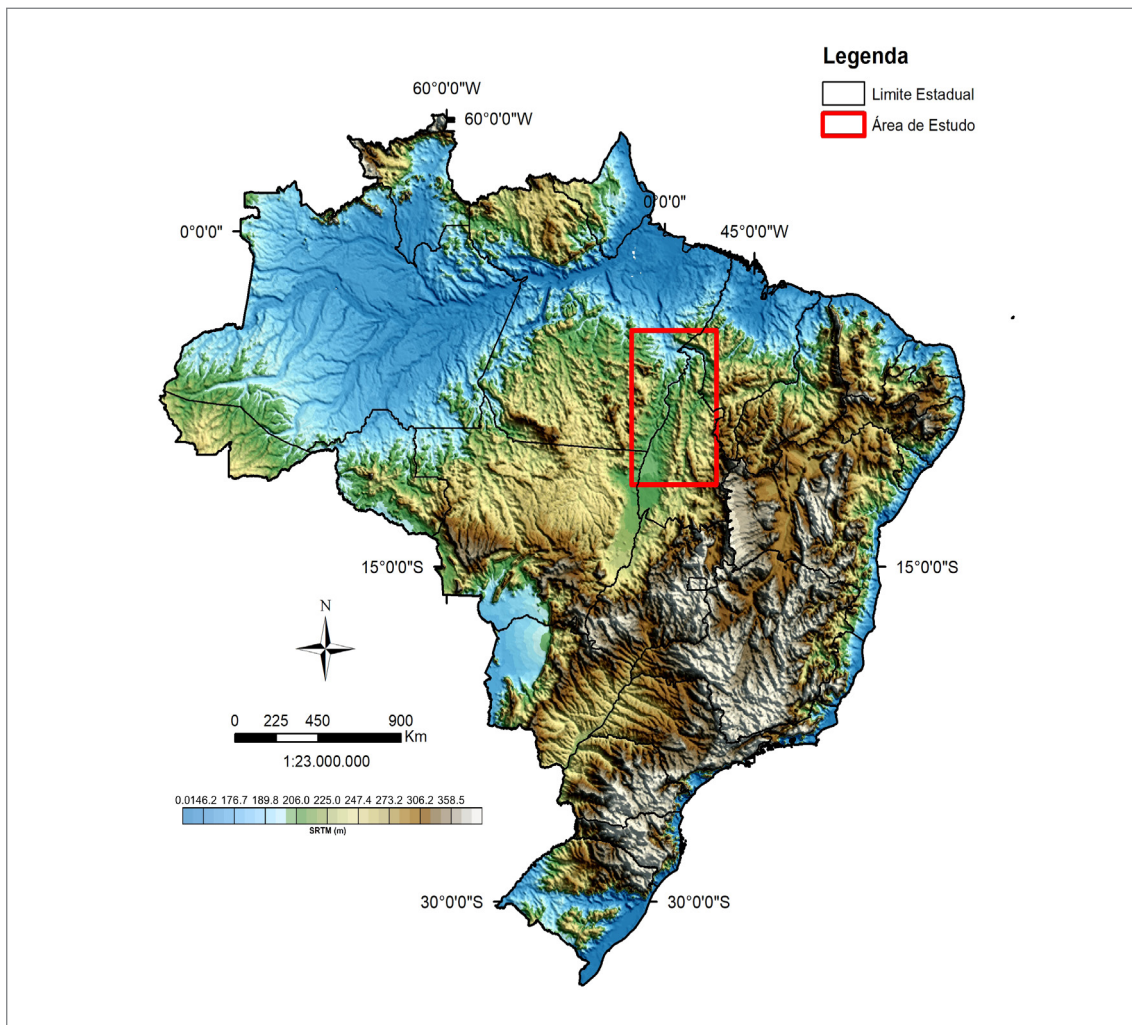


Figura 1 – Localização geográfica da área do Projeto (Longitude -47° / -51°, Latitude -5°/-11°). Dados topográficos do GLOBE DEM do projeto Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE). Fonte: Hastings et al. (1999).

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Contexto Geográfico

A área de estudo abrange três ambientes geológicos e geográficos distintos. Na porção oeste, temos o ambiente formado por rochas do Cráton Amazônico de relevo ondulado; na porção central, na Faixa Araguaia, o relevo é plano com pequenas serras; no lado leste, encontra-se a Bacia Sedimentar do Parnaíba, com relevo bastante diversificado, com áreas de planícies, chapadas, serras e depressões, sendo cortado pelo Rio Parnaíba, quinto maior rio do Brasil e o maior rio original do Nordeste brasileiro.

O relevo da área de estudo é apresentado na Figura 2.

O projeto está inserido nos biomas: Cerrado, Catinga e pequena parte de floresta de transição amazônica. No domínio do Cerrado, o clima é predominante tropical sazonal, onde as estações do ano são bastante definidas: chove bastante no verão e o inverno é seco. Na Catinga o clima é semiárido.

2.2. Compartimentação Tectônica

A Bacia do Parnaíba (BPar) é uma grande sinéclise paleozoica, sustentada por um embasamento cristalino pré-cambriano, que compreende uma estrutura litoestrutural e tectônica complexa formada durante o Neoproterozoico, colagem orogênica Brasileiro–Pan-Africana. Essa bacia sedimentar intracratônica, com até 3,5 km de espessura e 1.000 km de comprimento (Almeida; Carneiro, 2004; Oliveira; Mohriak, 2003; Vaz *et al.*, 2007). O embasamento é constituído por uma série de segmentos crustais, os quais são o resultado do processo de aglutinação do Gondwana Ocidental pela colagem geral dos crátons Amazônico, São Luís, África Ocidental e São Francisco-Congo. Os cinturões neoproterozoicos envolveram as massas cratônicas, convergindo para um embasamento chamado Bloco Parnaíba (Figura 3), em um ambiente colisional oblíquo (Almeida *et al.*, 2000; Trompette, 1984).

A BPar faz limite, a oeste, com o Cinturão Araguaia (Paraguaia–Araguaia) e o Maciço de Goiás e, ao sul, com a Faixa de Dobramentos Brasília. Ao norte, repousa sobre o Cráton São Luiz, cujo limite com a Faixa de Dobramento Gurupi tem sido definido com a Zona de Cisalhamento Tentugal, que é também considerada uma zona de sutura entre esses dois terrenos de idades proterozoicas e apresenta uma direção estrutural NW-SE (Hasui; Abreu; Villas, 1984; Abreu; Lesquer, 1985; Klein; Lopes; Chaves, 2015). O Bloco Parnaíba é delimitado, a leste, pelo Lineamento

Transbrasiliiano (LTB), orientado NE-SW, que, ao lado de outras zonas de cisalhamento, representa a principal tendência estrutural da Província de Borborema e controlam os depocentros paleozoicos (Schobbenhaus; Campos, 1984; Brito Neves; Santos; Schmus, 2000; Cordani *et al.*, 2013; Oliveira; Mohriak, 2003 e suas referências). Outras importantes estruturas são os arcos do Tocantins (Arco do Capim), São Francisco e Ferrer-Urbano Santos, que serão discutidos daqui em diante.

A estrutura de Xambioá, juntamente com o arqueamento do Alto do Parnaíba, é orientada na direção E-W e parece ter continuidade nos lineamentos da Província Borborema (Castelo Branco; Coimbra, 1984). A implantação de riftes sobre a estrutura Xambioá está relacionada ao afinamento crustal, com distensão NE-SW, e a formação de grabens, de direção ENE-WSW e NNE-SSW (Góes, 1995; Hasui; Abreu; Villas, 1984; Costa *et al.*, 1991).

A progressiva abertura do Atlântico causou o deslocamento rotacional no sentido horário do continente, reativando as falhas causadas pelo LTB, e os esforços foram responsáveis pelo surgimento de pequenas bacias em grabens nas zonas do embasamento (Szatmari *et al.*, 1987; Cordani *et al.*, 2013).

As principais estruturas descritas estão delimitadas na Figura 3.

2.2.1. Os ambientes que limitam a borda oeste da Bacia do Parnaíba

A oeste da área de estudo, encontram-se os terrenos do Cráton Amazônico que são constituídos por ambientes metamórficos de alto grau, arqueanos e paleoproterozoicos (Macambira; Lafon, 1995), destacando-se os terrenos *greenstone belt*.

O Domínio Carajás está localizado na porção sul-oriental do Cráton Amazônico e apresenta uma coluna estratigráfica controversa onde diversas classificações foram propostas. É composto de sequências metavulcanossedimentares com raras unidades ultramáficas, além de apresentar magmatismo mesoarqueano e granitogênese neoarqueana.

O embasamento é constituído pelo Complexo Pium, de cerca de 3.0 Ga. (Oliveira, 2002). A Província Carajás, localizada na região sudeste do estado do Pará, representa o núcleo crustal mais antigo e, também, o mais preservado do Cráton Amazônico. É subdividida em dois domínios tectônicos principais: Rio Maria e Carajás. Esses domínios, por sua vez, são

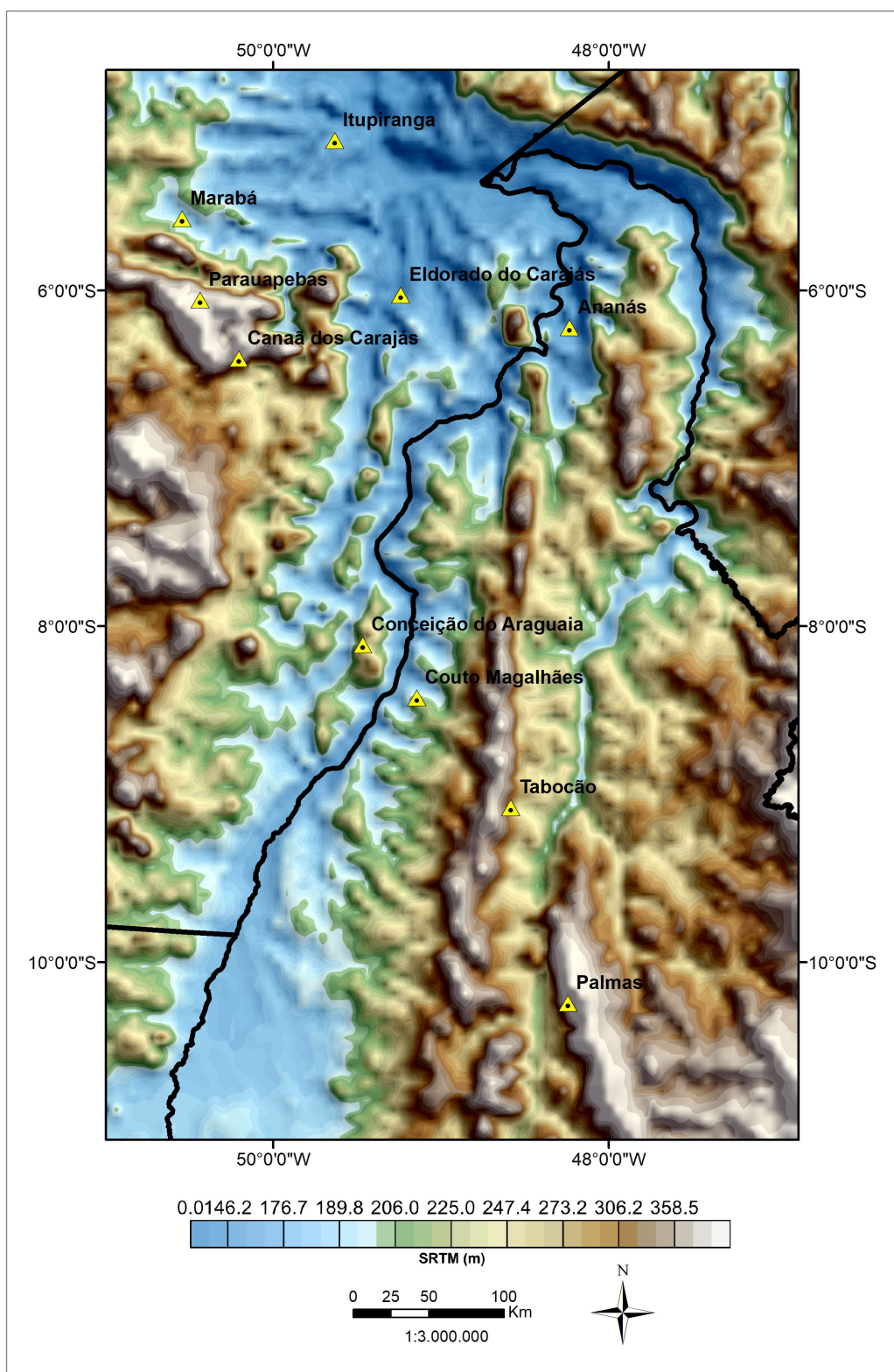


Figura 2 – Topografia da área do projeto (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM - NASA).
 Fonte: <https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>

separados por uma descontinuidade regional de direção aproximada E-W (Dall’agnol *et al.*, 2013).

Mais a sul, o Domínio Rio Maria caracteriza-se por ser formado por uma crosta de idade mesoarqueana, e que

apresenta seqüências de *greenstone belts* e granitoides do tipo tonalito-trondhjemito-granodiorito (TTG). Já o Domínio Carajás é constituído por uma crosta continental predominantemente neoarqueana, composta por seqüências

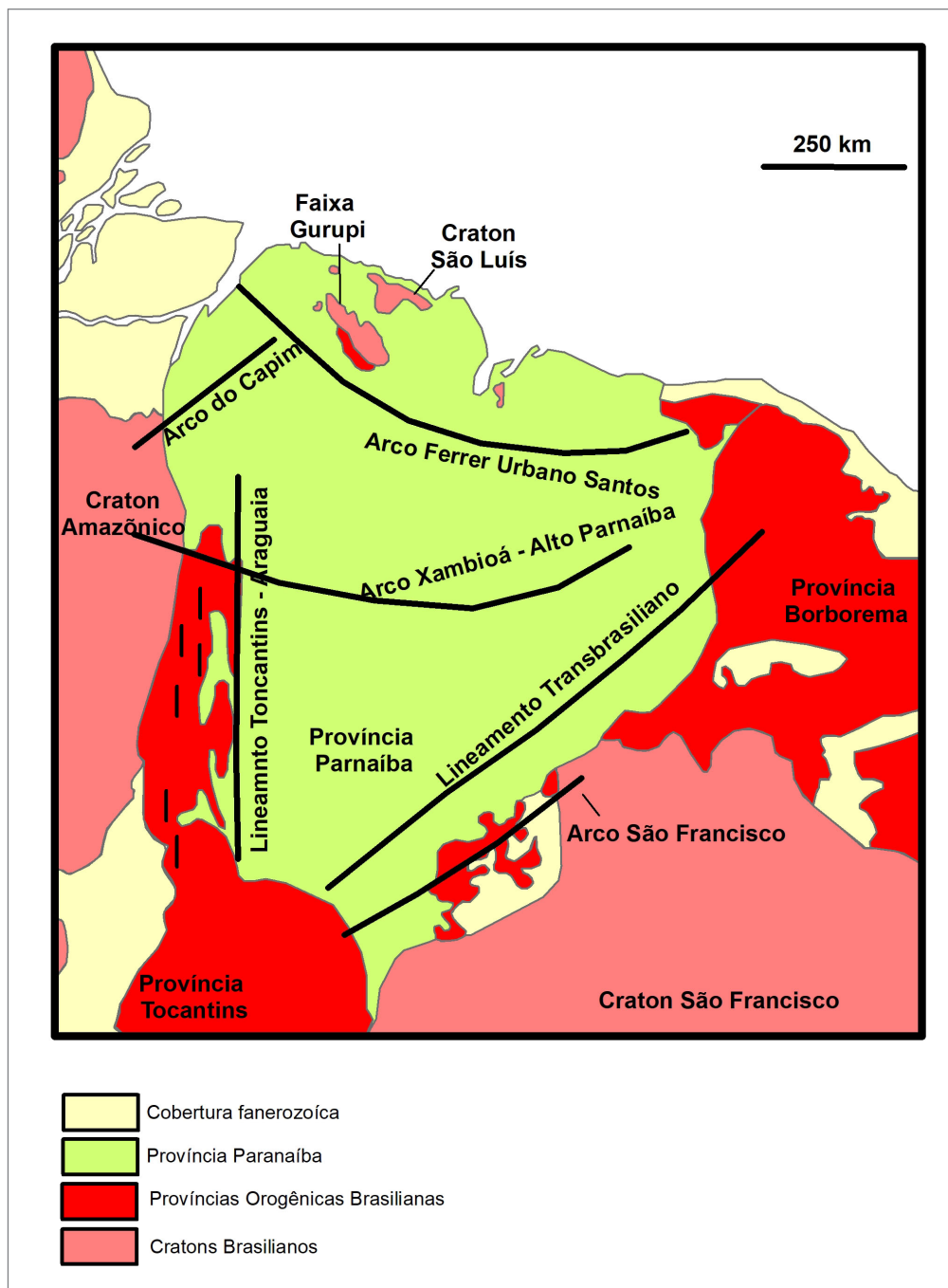


Figura 3 – Mapa das principais estruturas da Província Paranaíba, com crátons e blocos orogênicos adjacentes, além de arcos e lineamentos que influenciam a formação do embasamento e a sedimentação da bacia. Fonte: (Adaptado de Gorayeb, 1996).

metavulcanossedimentares, além de granitoides com alto teor de potássio.

A noroeste da BPar, localiza-se o ambiente cratônico paleoproterozoico denominado Bacajá (Vasquez; Sousa; Carvalho, 2006).

Na parte ao sul, próximo à Zona de Cisalhamento Brasileira (ZCB), afloram rochas metavulcânicas sedimentares de idade arqueana (Costa *et al.*, 1988), denominado Maciço Goiás, com terrenos paleoproterozoicos formados

basicamente por gnaisse tonalíticos a graníticos e calciosilicáticos. Na parte sul-sudeste, estão os terrenos de alto grau metamórfico, com afloramentos de enderbitos, granulitos máficos, kinzigitos e outros de natureza plutônica de composição granítica. Esses limites estruturais são visíveis no mapa geológico simplificado das unidades geocronológicas, apresentado na Figura 4.

A Faixa Araguaia destaca-se na área como uma importante unidade geotectônica neoproterozoica, fazendo parte

da denominada Província Tocantins (Gorayeb; Moura; Abreu, 2008). Apresenta-se como uma faixa de terrenos alongados, orientada aproximadamente na direção N-S. Lito-logicamente, constitui-se de rochas metassedimentares,

com predomínio das metapelíticas e, em menor proporção, rochas metamórficas carbonáticas e magmáticas. Interessante que a faixa possui uma estruturação N-S e intercepta estruturas WNW-ESE e E-W mais antigas. Na

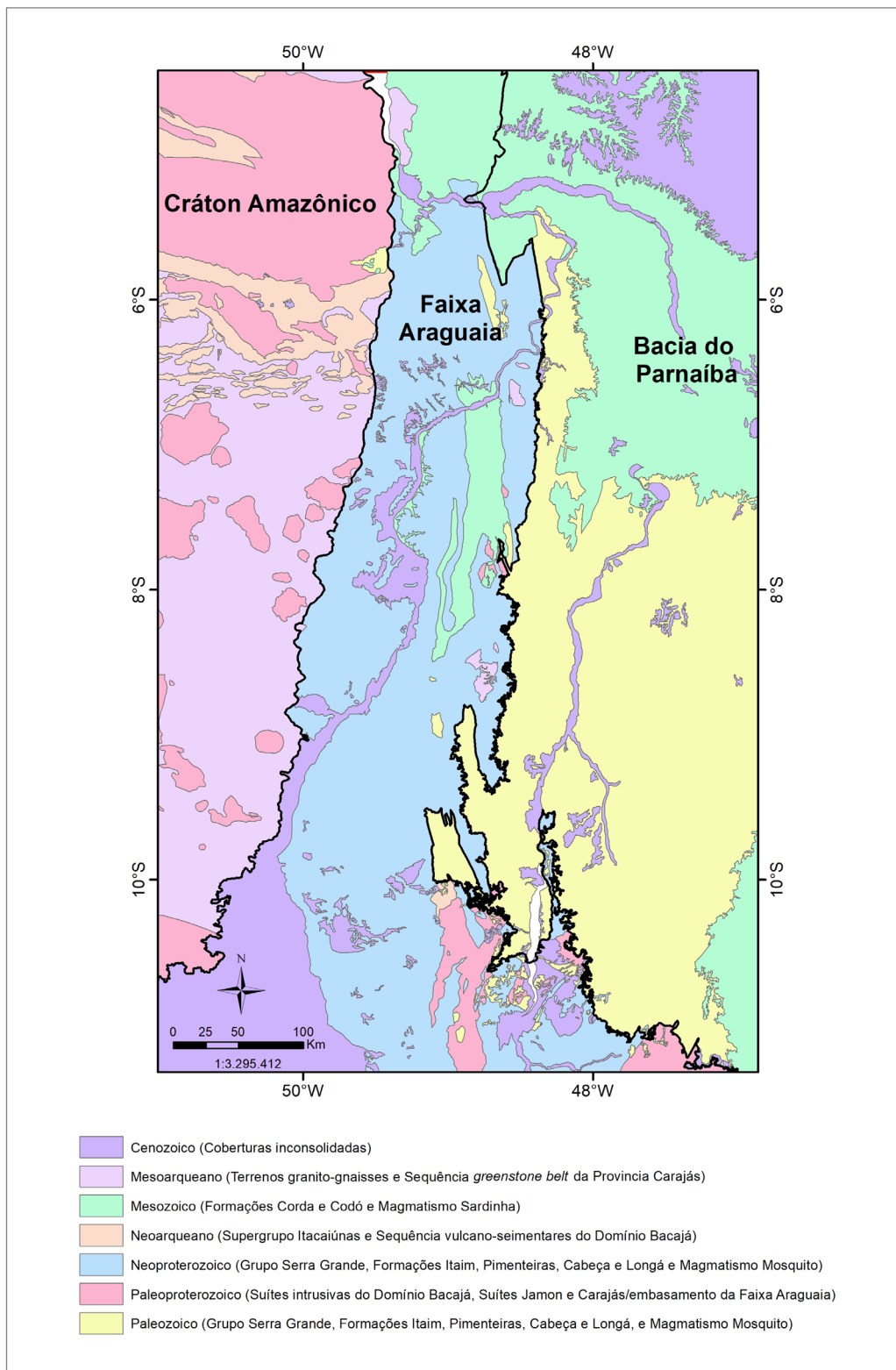


Figura 4 – Mapa geológico simplificado da região do limite oeste da Bacia do Parnaíba, com as grandes unidades geológicas divididas por ambientes geocronológicos. Fonte: elaborado pelos autores.

porção sul, foi constatada a presença de sedimentações cenozoicas (Gorayeb; Moura; Abreu, 2008). Nessa faixa, existem rochas máficas e ultramáficas associadas ao embasamento cristalino e rochas supracrustais existentes que foram interpretadas como ofiolitos remanescentes (Alvarenga *et al.*, 2000; Paixão; Nilson; Dantas, 2002). Finalmente, na porção extremo leste, ocorrem as rochas sedimentares fanerozoicas pertencentes da BPar. Esta é separada de suas bacias vizinhas por altos estruturais (arcos estruturais) gerados por processos tectônicos. O Arco Ferrer-Urbano Santos, localizado a norte-nordeste, delimita a Bacia do Parnaíba das bacias São Luís, Barreirinhas Bragança-Viseu e Ilha Nova. O Arco de Tocantins ou Capim, situado a noroeste, separa as bacias do Parnaíba e Marajó e o Arco do São Francisco, ao sul, separa a Bacia do Parnaíba da Bacia do São Francisco (Rezende; Pamplona, 1970; Góes, 1995).

2.2.2. As rochas da Bacia do Parnaíba

Também, pode ser definida como Província Sedimentar do Meio-Norte, que anteriormente era considerada como uma unidade tectônica única. No entanto, devido a sua evolução policíclica, a província foi dividida em quatro bacias diferentes: Parnaíba (paleozoica a triássica), Alpercatas (jurássica), Grajaú (cretácea) e Espigão Mestre (cretácea), com gêneses e idades distintas.

A BPar tem a coluna sedimentar litoestratigraficamente dividida nos grupos Serra Grande, Canindé e Balsas. Estratigraficamente, acima desses grupos estão as formações Pastos Bons, Itapecuru, Corda, Grajaú e Codó; as três últimas contemporâneas de idade neoptiana-eoalbian (Rezende, 2002). Além desse pacote sedimentar, ocorrem rochas ígneas básicas na forma de derrames, diques e soleiras, que foram individualizadas em duas unidades estratigráficas distintas: magmatismos Mosquito e Sardinha (Aguiar, 1971). A primeira é formada por derrames e diques de idade triássica a jurássica, aflorantes na porção ocidental da bacia, e a segunda na forma de diques e soleiras de idade cretácea, que são observados na borda oriental da bacia. Com base na estratigrafia de seqüências, a sucessão de rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba, anteriormente individualizada por meio da litoestratigrafia, pode ser disposta em cinco superseqüências: siluriana (Grupo Serra Grande), mesodevoniânica-eocarbonífera (Grupo Canindé), neocarbonífera-eotriássica (Grupo Balsas), jurássica (Formação Pastos Bons) e cretácea (formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru), todas limitadas por discordâncias que se estendem por toda a bacia ou abrangem vastas regiões (Vaz *et al.*, 2007; Lima; Leite, 1978; Santos, 2003).

O Grupo Canindé, é composto pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças e Longá (Caputo, 1984). A Formação

Pimenteiras é considerada rocha geradora com maturação dependendo do magmatismo das rochas ígneas.

As rochas provenientes de expressivo processo de magmatismo intrusivo e extrusivo, durante o Mesozoico, foram também denominadas como Anticlise de Alpercatas (Góes, 1995).

2.2.3. Contexto do Potencial Geoeconômico

A Bacia do Paraná (BPar) é uma região importante tanto para a produção agrícola quanto para a produção de energia hidrelétrica. Com cerca de 665.000 km², a região apresenta espessuras de até 3.500 m em algumas partes. Atualmente, existem 98 poços exploratórios, 49 poços pioneiros e 12 poços estratigráficos na região, o que faz da BPar a segunda maior produtora de gás em terra no Brasil, com cerca de 7% da produção nacional de gás natural. As principais reservas estão localizadas na parte central da bacia, incluindo as reservas de Gavião Real. Estudos indicam que existem outros locais com potencial semelhante às reservas da série Gavião, como relatado pela ANP na Rodada 13 (ANP, 2015).

A deposição da principal rocha geradora na Bacia do Parnaíba, a Formação Pimenteiras, ocorreu durante o Devoniano, associado a um evento anóxico global, que foi responsável pela deposição de folhelhos com alto teor de radioatividade e resistividade e baixa densidade, representativo do período de máxima inundação marinha (Rodrigues, 1995).

O potencial de geração de hidrocarbonetos na Bacia do Parnaíba está diretamente relacionado às intrusões ígneas que frequentemente acometem as rochas geradoras da Formação Pimenteiras. O incremento térmico decorrente das intrusões foi o catalisador para a geração. A Formação Pimenteira é potencialmente geradora, com isólitais de até 60 m. As formações Tianguá (Siluriano) e Longá (Devoniano-Fameniano) são consideradas geradoras potenciais secundárias (Abreu *et al.*, 2019).

Os principais reservatórios da Bacia do Parnaíba são os arenitos devonianos da Formação Cabeças. Além disso, os arenitos parálcos mesocarboníferos da Formação Poti são outro importante reservatório na bacia. Os arenitos continentais e costeiros neocarboníferos da Formação Piauí são reservatórios secundários nas acumulações da Bacia do Parnaíba.

O selo mais eficiente é formado por intrusões de diabásio, que podem selar qualquer reservatório, independentemente de sua posição estratigráfica. A Formação Longá, também, apresenta-se como selo para um dos principais reservatórios, que é a Formação Cabeças.

As trapas esperadas são do tipo estrutural, podendo estar relacionadas às várias orogenias que afetaram a bacia. Estruturas relacionadas a intrusões ígneas podem

ser importantes por serem síncronas à geração de hidrocarbonetos. Os principais atores na Bacia do Parnaíba são os arenitos devonianos da Formação Cabeças e os arenitos carboníferos da Formação Poti, selados por intrusões ígneas em estruturas do tipo “chapéu de coco”. Espera-se que os arenitos devonianos da Formação Cabeças ocorram em trapas estruturais selados pela Formação Longá em estruturas dômicas regionais.

Em ambos ambientes do projeto, as atividades socioeconômicas são diversas, porém, na parte oeste, a mineração e a agropecuária vêm crescendo com mais intensidade.

A região de Carajás é considerada uma das mais importantes do mundo, principalmente devido a sua imensa variedade de bens minerais (Dardenne; Schobbenhaus, 2003). A Província Mineral Carajás, devido ao seu contexto geotectônico, representa, atualmente, a principal e maior Província Mineral do Brasil, por possuir uma diversidade incrível de recursos minerais, tais como ferro, ouro, cobre, manganês, elementos do grupo da platina (EGP) e níquel. Em menor quantidade, ou explorados como subproduto, ocorrem minérios de alumínio, prata, cromo, molibdênio, estanho, urânio e tungstênio.

3. BASE DE DADOS

3.1. Aspectos Gerais sobre as Bases de Dados

Os dados utilizados para execução do projeto foram oriundos de diversas fontes, dentre elas destacam-se as bases de dados do SGB-CPRM, ANP e do BNDG. Foram utilizadas, também, a do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (NASA) e Globe DEM do Projeto *Global Land One-kilometer Base Elevation*. Os dados que fizeram parte desses estudos foram os aerogeofísicos (magnetométricos, gamaespectrométricos e gravimétricos), gravimétricos terrestres, imagens de satélites e sísmicos.

3.2. Dados Geofísicos

3.2.1. Dados Gamaespectrométricos, Magnetométricos e Gravimétricos

O SGB-CPRM investiu, nos últimos 15 anos, na aquisição de dados aerogeofísicos, recobrando cerca de 93% das áreas de escudo cristalino brasileiro com dados radiométricos e magnetométricos de alta resolução. Para integrar esses dados aerogeofísicos e atualizar o mapa magnético do Brasil, foram utilizados dados da plataforma continental da malha Aeromag Brasil de Costa *et al.* (2010), integrados aos dados do banco de dados do SGB-CPRM, gerados a partir da contribuição de diversos convênios com instituições das esferas federal e estadual.

A Base de Dados de Projetos Aerogeofísicos do Brasil, denominada AERO, foi criada pelo SGB-CPRM em 1995. Ela contém os principais levantamentos aerogeofísicos executados desde 1952, localizados na região dos embasamentos cristalinos. Na base AERO, foram utilizados os aerolevantamentos geofísicos da série 1000 e o projeto da ANP - Bacia do Parnaíba (Código 050/2006) na compilação dos *grids*, como Carajás área 1 (1047), Carajás área 2(1050), Carajás área 3 (1051), Anapu-Tuerê (1064), Tocantins (1069), Nordeste do Mato Grosso (1098), Tucuruí (1096), Conceição do Araguaia (1108), Oeste de Carajás (1130), Rio Maria (1132), Rio Formoso (1128), Carajás (1120) e Rio Bacajá (1135).

Os aerolevantamentos geofísicos do SGB-CPRM apresentam características distintas do projeto da ANP, como

um menor espaçamento das linhas de voo e altura padrão de 100 m do solo. Os dados de métodos potenciais da base da ANP do Aerolevantamento Bacia do Parnaíba (ANP, 2006) recobrem a região da bacia e foram obtidos com parâmetros de voo de resolução regional com altura fixa de 1.000 m do nível do mar. O levantamento gravimétrico foi realizado com o sensor Graviton, da empresa Fugro, que mediu a aceleração da gravidade em relação a uma estação de referência vinculada à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB).

Os dados de gravimetria terrestre foram obtidos através do BNDG, constituído por um grupo de instituições governamentais e privadas que se uniram com o objetivo de concentrar os levantamentos gravimétricos terrestres existentes em todo o país. Atualmente, a gestão do BNDG está sendo feita por técnicos da ANP/BDEP.

Na Figura 5, estão identificados os levantamentos aerogeofísicos utilizados no projeto. Devido à sobreposição, as regiões com projetos antigos e de menor resolução foram descartadas.

3.2.2. Dados Sísmicos

O perfil sísmico de reflexão "transecta", com extensão total de 1.430 km, foi adquirido pela *Global Geophysical Services Inc* para o projeto "Parnaíba Basin Analysis" da *Bristh Petroleon* (BP), ANP, com a participação da Universidade de Brasília (UNB), para os estudos de estruturas profundas da crosta. Os dados foram gentilmente cedidos pela Cimageo.

O perfil sísmico completo foi dividido em cinco linhas sísmicas, registradas ao longo de estradas que permitissem a passagem de vibradores, iniciando no estado do Pará, seguindo pelos estados de Tocantins, Maranhão, Piauí e terminando no estado do Ceará, conforme mostra a Figura 6.

3.2.3. Dados de Poços de Exploração

A área de estudo contempla seis poços perfurados pela Petrobras, cedidos ao projeto pelo BDEP por acordo de cooperação técnico-científica. Desses, somente um poço foi coincidente com os perfis geofísicos e foi usado para correlacionar com a profundidade do embasamento.

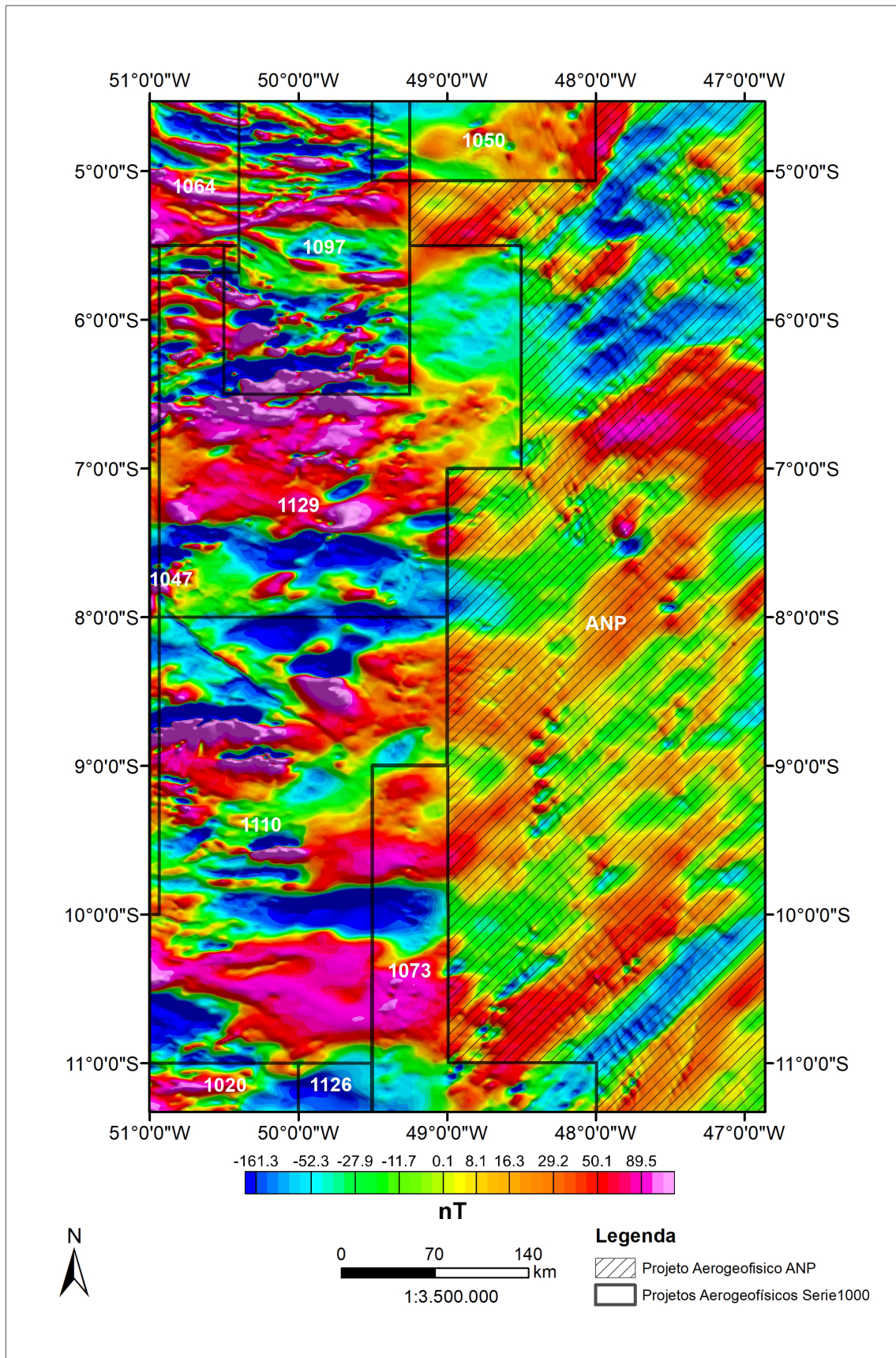


Figura 5 – Aerolevamentos geofísicos da série 1000 e da ANP – Bacia do Parnaíba, sobrepondo o mapa do CMA integrado.
Fonte: elaborado pelos autores.

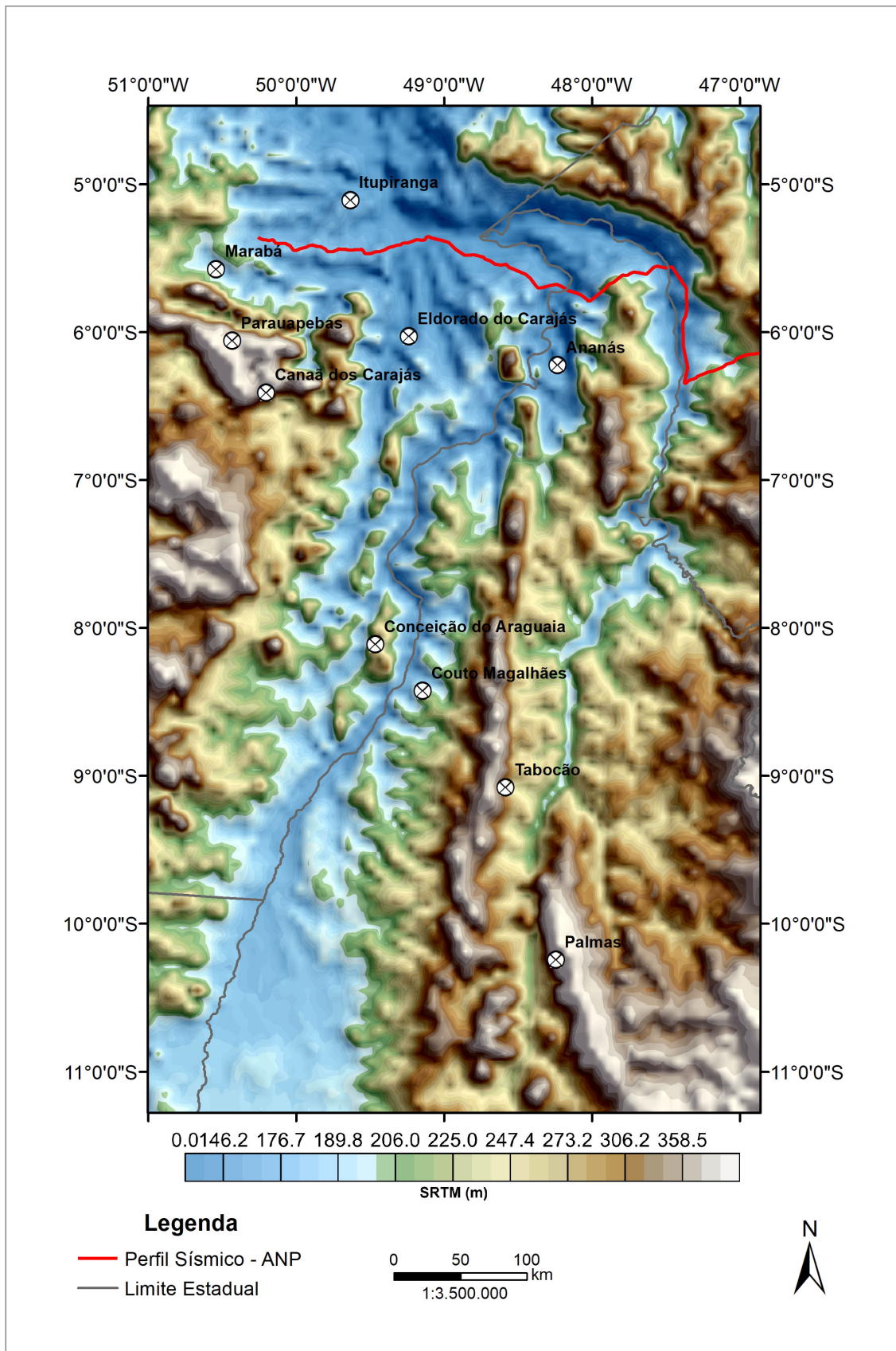


Figura 6 – Mapa SRTM (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM - NASA) mostrando a linha sísmica completa.
Fonte: elaborado pelos autores.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS MÉTODOS E PROCESSAMENTO DOS DADOS

4.1. Magnetometria

O método magnetométrico mede o campo magnético da Terra, considerado como produzido por um momento de dipolo localizado no centro da Terra, apontando para o sul e formando um ângulo em relação ao eixo de rotação. Os pontos em que o eixo do dipolo intercepta a superfície da Terra são denominados polos geomagnéticos. As linhas de forças que atravessam a esfera terrestre ficam paralelas com a superfície nas proximidades do equador, que é composto por três partes: o campo principal que tem origem no núcleo externo da Terra; o campo externo, produzido por correntes elétricas que circulam na ionosfera e varia rapidamente; e variações do campo principal, que são constantes no tempo e são causadas por anomalias magnéticas locais geradas por rochas e minerais magnéticos próximos da superfície da Terra (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

As rochas ígneas podem ter diferentes níveis de magnetismo. As rochas ígneas básicas são, geralmente, mais magnéticas devido ao seu alto teor de minerais magnéticos, como a magnetita. Já as rochas ígneas ácidas tendem a ter menos magnetismo, devido à diminuição da proporção de magnetita conforme a acidez aumenta. As rochas metamórficas podem variar em seu caráter magnético, enquanto as rochas sedimentares, geralmente, apresentam baixo magnetismo (Kearey; Brooks; Hill, 2013).

Os dados magnetométricos têm uma importante contribuição na exploração geológica, pois permitem a inferência da terceira dimensão dos dados geológicos. Com interpretações e modelagens, é possível desvendar feições geológicas em profundidade, incluindo corpos e estruturas. Zonas de cisalhamento são facilmente identificáveis em mapas magnetométricos, mas sua contribuição é fundamental para a delimitação tridimensional de formações vulcânicas, intrusões de rochas básicas e de granitoides magnéticos.

Os dados magnéticos foram processados e corrigidos para remoção de ruídos e outras interferências, tais como a variação diurna do campo geomagnético e a componente principal do campo (IGRF).

Alguns projetos aerogeofísicos requereram a aplicação de filtros para remover ruídos, por isso os dados magnéticos foram interpolados para gerar malhas regulares do campo magnético anômalo (CMA). Para gerar o mapa magnético integrado da região, foram aplicados filtros de continuação nos dados de cada projeto aerogeofísico para uma altura de voo de 500 m. Os dados aerogeofísicos continuados foram integrados por meio de uma rotina de sutura (Gridnit) para

eliminar deslocamentos verticais nos valores das anomalias magnéticas, promovendo um nivelamento nos conjuntos de dados (Cheesman *et al.*, 1998).

Os limites dos projetos magnetométricos e gamaespectrométricos aproximam-se dos contatos dos grandes blocos tectônicos, prejudicando o processamento de integração dos dados e os processamentos avançados como a deconvolução de Euler. Isso dificulta a compreensão e a demarcação dos limites geológicos. Além disso, existe uma diferença nos parâmetros de aquisição dos aerolevantamentos e a sua sobreposição.

Na imagem CMA, bem como as imagens processadas a partir dela (Figura 7), foram aplicadas técnicas de realce para geração de novos modelos, como:

- Gradiente Total (GT/ASA) – Anteriormente denominado de amplitude do sinal analítico (Macleod; Cohen, 1993), o gradiente total (Figura 7, acima à direita) é uma técnica de filtragem muito eficiente na localização de limites e na profundidade dos corpos. Sua função é expressa por um vetor de adição de duas componentes reais nas direções (X e Y) e por uma imaginária na direção Z. É uma excelente opção alternativa à redução ao polo para o problema de localização de fontes magnéticas em baixas latitudes;
- Primeira Derivada Vertical (DZ) – As derivadas são filtros empregados para enfatizar fontes rasas, muito utilizados para interpretar lineamentos magnéticos (Figura 7, abaixo à esquerda);
- Inclinação do Sinal Analítico (ISA/Tilt TMI) – A inclinação do sinal analítico possui valores máximos relativos no centro dos corpos (equalização das amplitudes) (Figura 7, abaixo à direita);
- Gradiente Horizontal Total (GHT) – Com as derivadas horizontais, é possível realçar as bordas dos corpos magnetométricos.

4.1.1. Cálculo da superfície Curie com base em dados potenciais

Estudos sobre a estrutura termal da crosta, geralmente, são feitos com medidas de fluxo térmico. A temperatura Curie marca a profundidade de desmagnetização da crosta, correspondendo à isoterma de 580 °C, que é o ponto de desmagnetização da magnetita (Blum, 1995). Com os dados aeromagnetométricos, é possível estimar as dimensões de corpos magnetizados para entender a estruturação termal da crosta que corresponde ao embasamento magnético. Processos geodinâmicos, como vulcanismo, intrusões,

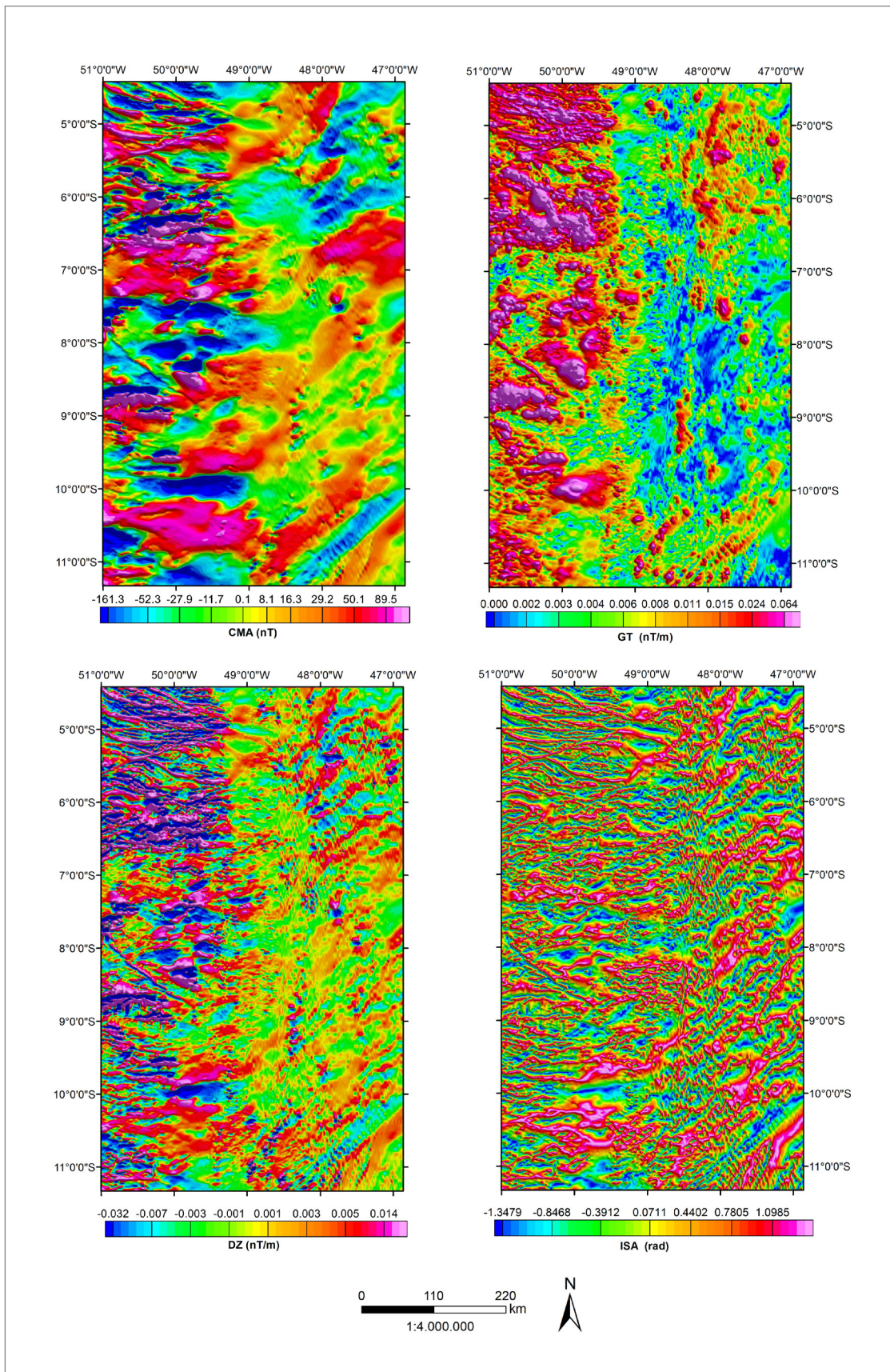


Figura 7 – Imagem do campo magnético anômalo (CMA) (acima à esquerda), imagem do Gradiente Total (GT) (acima à direita), imagem da primeira Derivada vertical (DZ) (abaixo à esquerda) e imagem da • Inclinação do Sinal Analítico (ISA) (abaixo à direita).

terremotos, soerguimento de montanhas e metamorfismo, são controlados pela geração e pela transferência de calor na Terra, uma vez que a reologia dos sólidos é função, principalmente, da temperatura (Correa, 2015).

Foram feitas duas estimativas das profundidades Curie a partir do estudo detalhado do comportamento dos espectros de potência dos dados magnetométricos. Para análise do espectro radial de potências, utilizou-se janelas quadráticas de 250 km x 250 km (Figura 8, à esquerda) e 300 km x 300 km (Figura 8, à direita), espaçadas de 100 km x 100 km, que serviu como base de cálculo dos parâmetros usados nas estimativas de profundidade. Os gráficos gerados de cada janela são analisados individualmente. Alguns pontos não são semelhantes com o modelo gerado. Para melhorar a precisão do modelo, usou-se janelas próximas do tamanho aproximado (250 km e 300 km) para comparar os valores gridados. A figura da superfície Curie, com janela aproximada de 250 km, apresentou menor efeito de borda.

4.2. Gamaespectrometria

A gamaespectrometria é uma técnica baseada em princípios físicos sólidos e apresenta relações com o estudo

de sensores remotos. Trata-se de uma medida do campo natural do planeta Terra, onde as variações de frequência geram contrastes que permitem interpretações para diversos tipos de estudos, incluindo os geológicos.

A espectrometria de raios gama é capaz de separar os radioelementos da radioatividade total convencional, incluindo as contribuições energéticas dos isótopos da série do U, Th e K. A relação desses radioelementos permite uma ampla gama de soluções nos trabalhos básicos de pesquisas geológicas e pedológicas, bem como na prospecção de minerais.

Nos sedimentos, o urânio e o tório apresentam comportamentos distintos. Embora o urânio seja altamente insolúvel, o íon uranila é capaz de formar compostos complexos que são geralmente solúveis, enquanto o tório é altamente insolúvel e não forma compostos solúveis na natureza.

Devido a essa diferença, o urânio pode ser transportado em ambientes de oxidação, enquanto o tório não. O urânio é transportado pelas águas dos rios em suspensão e solução, enquanto o tório, em geral, faz parte dos minerais pesados, sendo dificilmente transportado. O potássio é um elemento comum em muitos minerais, incluindo feldspatos e micas, sua presença é útil para identificar e mapear esses minerais em formações geológicas. Além

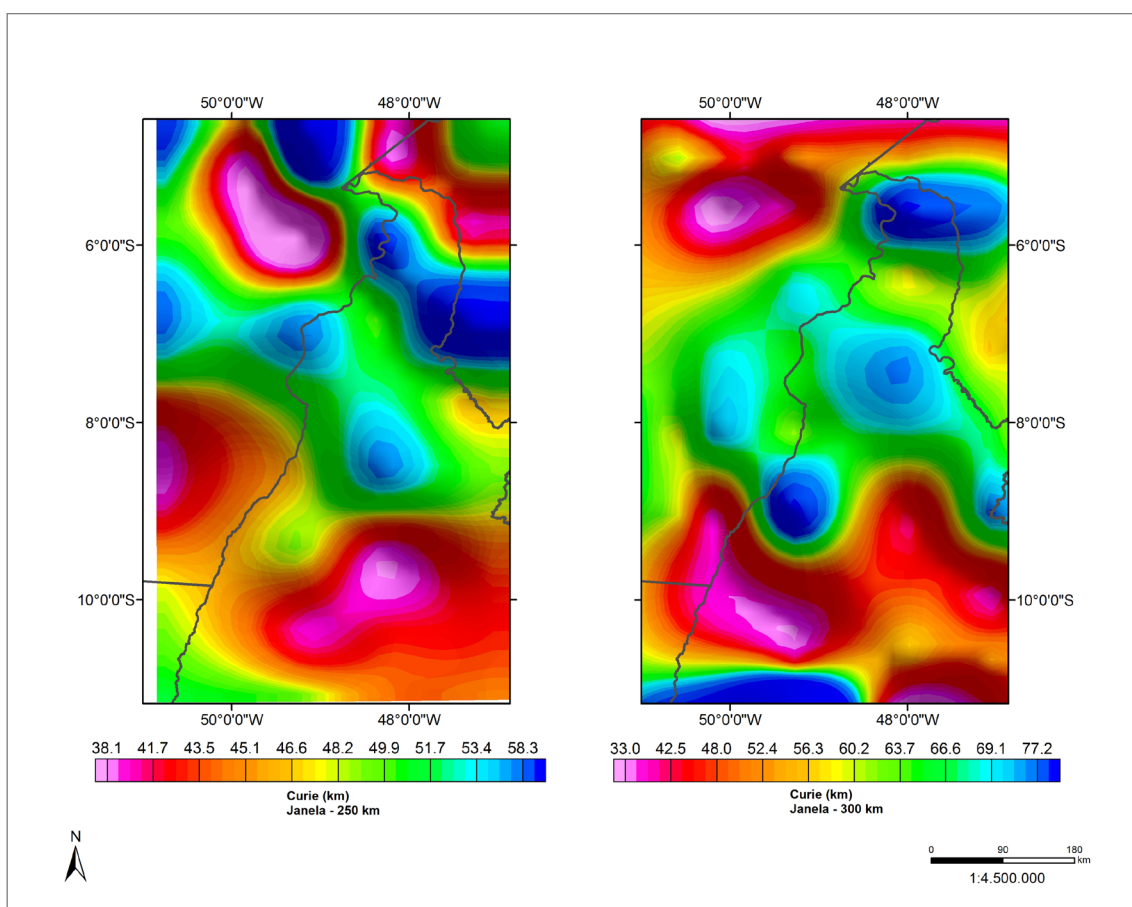


Figura 8 – Imagem das estimativas das profundidades Curie com janelas quadráticas de 250 km x 250 km (esquerda) e janelas quadráticas de 300 km x 300 km (direita). Fonte: elaborado pelos autores.

disso, a distribuição do potássio pode fornecer informações importantes sobre a estrutura geológica e a composição mineralógica de uma região.

Essas informações são importantes no momento da interpretação, pois permitem delinear a feição geofísica de forma mais precisa.

Os dados gamaespectrométricos receberam o mesmo fluxo de processamento de dados que os magnetométricos, exceto pela remoção do IGRF. Ainda, foi necessário realizar um nivelamento estatístico para suavizar as concentrações dos radioelementos entre os diferentes projetos aerogeofísicos. Espera-se que os projetos aerogeofísicos possuam um comportamento estatístico próximo, nas áreas em comum. Entretanto, nota-se que os dados possuem medidas de tendência central e de dispersão distintas. O nivelamento estatístico consistiu em selecionar o projeto aerogeofísico padrão e o secundário de acordo com o nível de ruído, recortar a área de intersecção em ambos e efetivar uma regressão linear para igualar o desvio-padrão e a média da malha secundária na malha padrão. Esses parâmetros são ajustados e os dados são integrados pelo método de sutura.

Nos dados gamaespectrométricos, a imagem de composição ternária RGB (Figura 9) representa as concentrações dos radioelementos potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU) da superfície da crosta. Essa imagem é uma composição pseudocolorida, em que as cores vermelha, verde e azul representam, proporcionalmente, as concentrações de potássio, tório e urânio. Assim, as regiões na cor branca significam altas concentrações nos três canais; enquanto as regiões na cor preta representam baixas concentrações dos três radioelementos. As áreas que aparecem na cor amarela representam concentrações relativamente baixas de urânio e altas concentrações de potássio e tório. A cor vermelha refere-se a zonas com baixas concentrações relativas de tório e urânio e elevada concentração de potássio.

O nivelamento das malhas de tório, potássio e urânio (Figura 9), em escala nacional, permite aos pesquisadores e aos exploradores compararem as assinaturas quantitativamente e acompanharem a variação dos radioelementos em larga escala. As razões entre esses radioelementos são muito utilizadas para criar contraste em regiões onde ocorrem processos de hidrotermalismo e realçar a diferença entre os elementos como visto na Figura 10.

4.3. Gravimetria

A gravimetria é um método que consiste no estudo do gradiente da aceleração da gravidade terrestre. A causa dessas variações provém da rotação, do achatamento, do acoplamento gravitacional com o Sol e a Lua, das variações morfológicas e das variações da densidade decorrentes das

mudanças composicionais e/ou geológicas da crosta. Para a prospecção mineral e a pesquisa do substrato terrestre, o fator mais importante são as variações da densidade, que refletem diretamente nas variações morfológicas, e as heterogeneidades composicionais do interior do planeta Terra. Tais investigações gravimétricas são possíveis, pois o gravímetro, instrumento utilizado nas medições pontuais do valor da aceleração da gravidade, é muito preciso e sensível. Portanto, variações pequenas de densidade do substrato terrestre podem ser detectadas e, conseqüentemente, quantificadas.

A unidade de aceleração da gravidade no SI é m/s^2 e, em homenagem a Galileu Galilei, utiliza-se o Gal (cm/s^2). Porém, as alterações da aceleração da gravidade ocasionadas por variações da densidade são muito sutis; logo, é mais usual a utilização do mGal ($10^{-5} m/s^2$).

Na gravimetria, é possível identificar as massas locais de maior ou menor densidade e extrair informações sobre formas e profundidades a partir de irregularidades no campo gravimétrico, nomeadas de anomalias gravimétricas. Essas irregularidades são interpretadas como resultado das variações laterais provocadas por estruturas geológicas ou corpos com diferentes densidades (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

Em geral, as rochas ígneas e metamórficas apresentam densidades mais elevadas que as rochas sedimentares. Além da composição mineralógica, a porosidade e o conteúdo de fluídos no poro são fatores que influenciam a densidade tanto em superfície quanto em subsuperfície. Por convenção, a densidade média da crosta continental é considerada como sendo $2,67 g/cm^3$ (Hinze; Von Frese; Saad, 2013).

Os dados obtidos do BNDG apresentam baixa resolução espacial, mostrando alguma concentração de pontos nas porções centro-norte e sul, mas há vazios de informações nas regiões centro-sul, leste e oeste da área do projeto. O processamento da anomalia Bouguer foi realizado com densidade $2,67 g.cm^{-3}$, e devido à má distribuição de pontos fez-se uma gridagem com célula de interpolação de 10 km, que apresentou uma imagem bastante segmentada, sendo necessário o uso da ferramenta *blaking distance* do *software Oasis Montaj*, para artificialmente melhorar a visualização.

A correção de Bouguer (Figura 11, à esquerda) busca eliminar os efeitos topográficos, permitindo uma análise mais clara das variações gravimétricas associadas à distribuição de massas no subsolo. Ela consiste em calcular a correção para cada ponto de medição, levando em consideração a altitude do ponto e a densidade média da região. A correção de ar-livre (Figura 11, à direita) tem como objetivo eliminar ou reduzir as variações causadas pela atmosfera, utilizando modelos matemáticos que descrevem a densidade atmosférica em função da altitude.

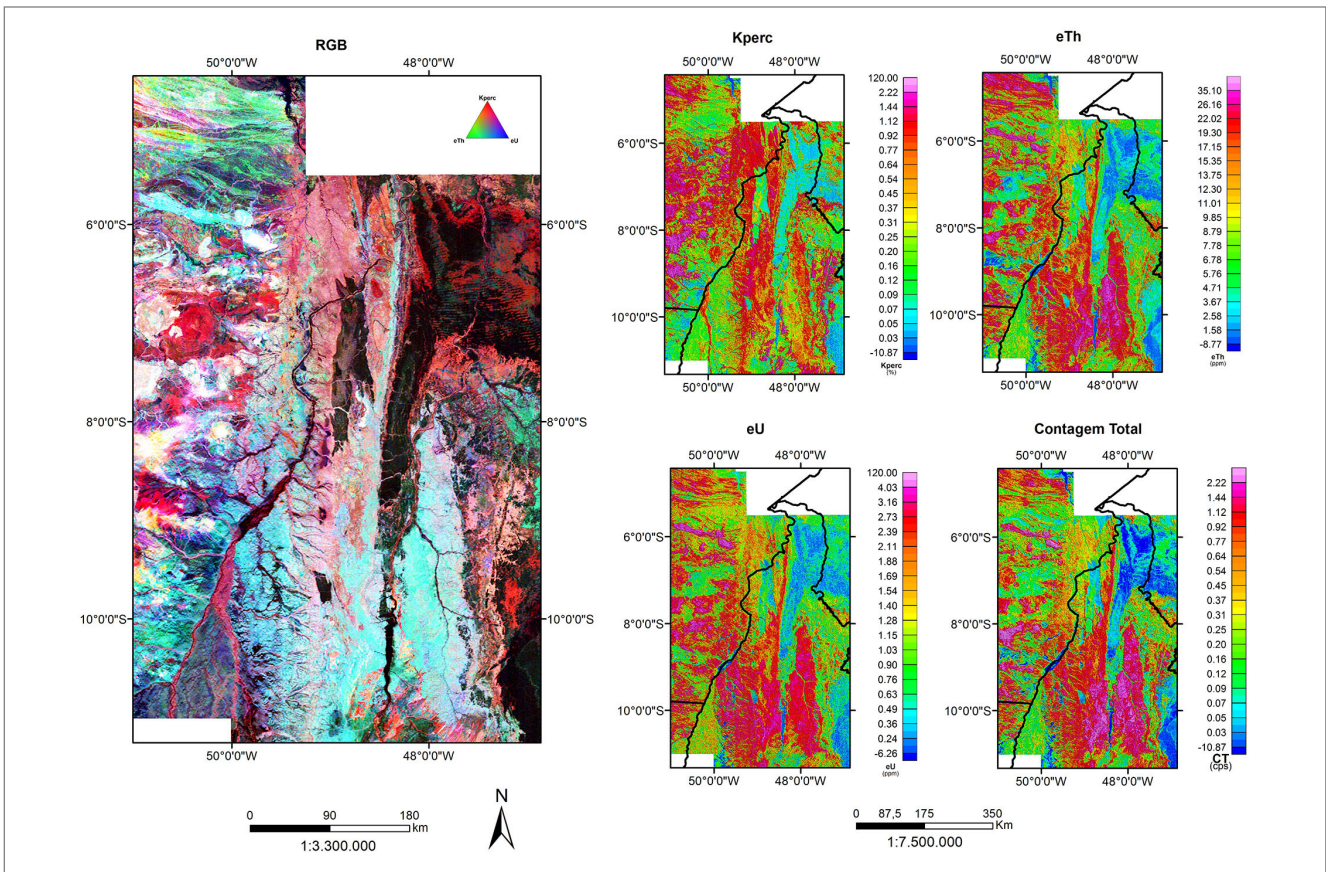


Figura 9 – À esquerda, a imagem de composição ternária RGB representa as concentrações dos radioelementos potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU); à direita e acima, as imagens dos radioelementos potássio e tório; e à direita e abaixo, a imagem do elemento urânio e a contagem total. Fonte: elaborado pelos autores.

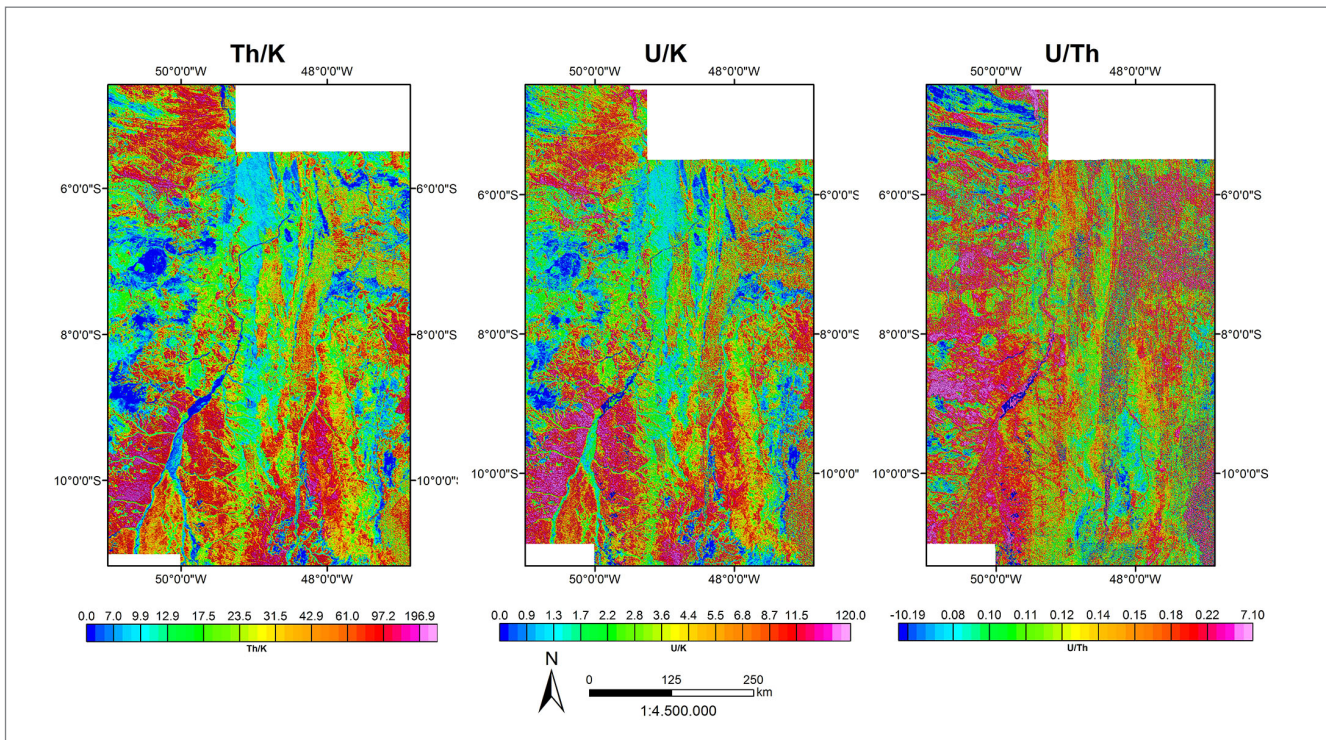


Figura 10 – Imagens das razões entre esses radioelementos. Da esquerda para direita: Th/k, U/k e U/Th. Fonte: elaborado pelos autores.

4.4. Método Sísmico

Para estimar as estruturas em subsuperfície, é utilizado o método de perfis regionais com base na reflexão das ondas sísmicas. Esse método determina o tempo que uma onda é refletida até atingir o receptor para estimar a estrutura que gerou a reflexão. Para que o levantamento sísmico seja efetivo, é necessário um arranjo focado que priorize a obtenção das ondas refletidas, excluindo as refratadas. Os perfis gerados são do tipo 2D, com direção preferencial E-W, e a fonte de emissão de sinais é realizada por meio de vibradores com um longo tempo de registro (20 segundos), permitindo buscar informações de estruturas profundas da crosta e do manto.

Foi analisado qualitativamente, com base nas amplitudes e frequências dos sinais das ondas, procurando

identificar as principais estruturas faciológicas da estratigrafia da bacia. Para facilitar o trabalho de integração com os demais produtos temáticos, efetuou-se a conversão dos dados de tempo para profundidade.

O processamento foi realizado até a profundidade aproximada de 4 mil metros, uma vez que o objetivo é o estudo do embasamento, principalmente na borda oeste da Bacia do Parnaíba. Foi possível elaborar o imageamento das principais interfaces geológicas da Bacia Sedimentar do Parnaíba e do embasamento cristalino.

Um dos principais objetivos da utilização desse método geofísico é a visualização dos horizontes estratigráficos e suas feições estruturais, juntamente com as demais informações geofísicas, para que as estruturas possam ser identificadas.

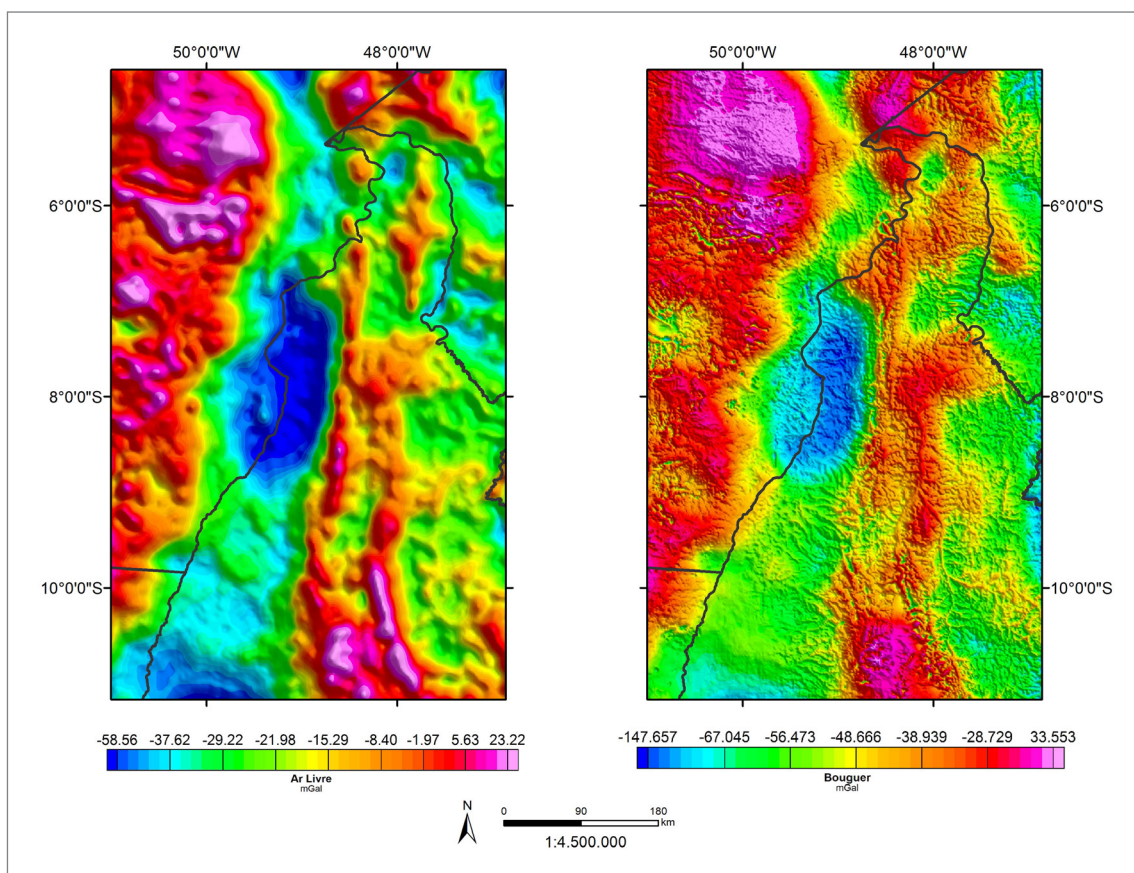


Figura 11 – Imagem da anomalia Bouguer, à direita, e imagem gravimétrica da anomalia ar-livre, à esquerda. Satélite GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*). Fonte: <https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/>

5. INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

O método magnetométrico foi fundamental na caracterização dos ambientes geológicos e eventos magmáticos. O forte contraste de susceptibilidade magnética entre as rochas ígneas e sedimentares da região foi eficaz para as interpretações. As técnicas de processamento aplicadas aos dados realçam ainda mais a resposta geofísica e possibilitam a visualização das feições e elementos da arquitetura interna da bacia sedimentar, como riftes, corpos magmáticos e embasamento.

O campo magnético anômalo (CMA) (Figura 12) mostra anomalias magnéticas assimétricas com dipolos variados e com a presença de anomalias magnéticas invertidas (remanescentes), em relevo magnético acidentado na região oeste da área, referentes às rochas do Cráton Amazônico (CA). O limite do CA com a Faixa Araguaia é marcado por quebra abrupta do relevo magnético. Na região da BPar, a leste, as anomalias magnéticas possuem maior comprimento de onda e relevo magnético moderado, com *trend* variando de NNE-SSW e NE-SW. Os corpos magmáticos da BPar e da Faixa Araguaia estão encobertos por uma espessa camada de sedimentos, e as intrusões apresentam maiores valores de susceptibilidade magnética e altas frequências em relação ao embasamento cristalino. Outras feições de forte destaque são o LTB, na parte sudeste do projeto com direção NE, e as estruturas E-W e NW-SE, no noroeste da área referente ao CA.

As fontes magnéticas profundas podem estar associadas com corpos e estruturas geológicas, tornando-se importantes para a compreensão do arcabouço geotectônico. As fontes rasas são de interesse prospectivo nas pesquisas de minerais metálicos, restritas aos níveis crustais rasos.

Face ao exposto, foram aplicados filtros direcionais do tipo passa-banda na imagem do campo magnético anômalo (CMA) para separar as fontes magnéticas profundas e rasas. Na imagem residual dos grandes comprimentos de onda (baixa frequência), podem ser observadas as fontes magnéticas profundas superiores a 8.600 m (Figura 13, à esquerda), que realçaram estruturas do Cráton Amazônico e do embasamento da Bacia do Parnaíba. Na imagem central da Figura 13, observa-se em uma profundidade média entre 8.600 e 2.200 metros. Algumas estruturas profundas, como o LTB, não são mais observadas, principalmente na parte leste do projeto. À direita da Figura 13, observa-se os curtos comprimentos de onda que são as feições mais superficiais com profundidade acima de 2.200 metros. Na região noroeste do projeto, onde as intrusões são pouco

profundas, bem como o derrame Mosquito de direção E-W, as altas frequências estão bem enfatizadas.

Na imagem das fontes magnéticas profundas, presencia-se o comportamento das estruturas geológicas do Cráton Amazônico, no oeste (E-W), em direção à borda oeste da Bacia do Parnaíba, passando pela Faixa Araguaia com direção de ENE-WSW para NE-SW.

A área do projeto abrange alguns domínios geotectônicos e sofre interferência de diversas estruturas continentais. O fechamento desses domínios geotectônicos originou as regiões complexas que, apesar dos diversos estudos realizados, ainda apresentam dúvidas no contexto de suas formações, como o entendimento da relação entre o LTB e a Faixa Araguaia. Esses domínios geotectônicos exerceram grande influência no interior da Bacia do Parnaíba e, provavelmente, são responsáveis pelos eventos magmáticos e pela geração de riftes (Milani; Thomaz Filho, 2000; Castro *et al.*, 2014).

Com base na interpretação qualitativa das imagens magnéticas, foram interpretados os domínios e lineamentos magnetométricos da borda oeste da BPar. As direções das estruturas magnéticas sugerem que as descontinuidades do embasamento cristalino, que influenciaram a localização dos eventos magmáticos no mesozoico e distribuição das estruturas grabeniformes, estão ligadas com a fase rifte da bacia (Mocitaiba; Castro; Oliveira, 2017).

Um sistema rifte bem significativo é observado nas imagens gravimétricas e nas estruturas magnéticas mais superficiais no centro da área (FA), com *trend* N-S com grabens subaflorentes na borda da Bacia do Parnaíba. Os riftes estendem-se sob a BPar e foram identificados nas seções sísmicas, apresentando correlação espacial. As estruturas grabeniformes resultaram da quebra continental (Mocitaiba; Castro; Oliveira, 2017).

Os *trends* estruturais de direção E-W e o Lineamento de Senador Pompeu (NE-SW) possuem relação com o LTB (Hasui; Haralyi, 1991; Mocitaiba; Castro; Oliveira, 2017) e foram mais efetivos na distribuição da atividade magmática intrínseca à Formação Mosquito.

Foram separados os lineamentos magnetométricos por sua natureza rúptil – dúctil (Figura 14). Assim, foram destacadas as direções preferenciais de cada evento tectônico na evolução da Bacia do Parnaíba e seus blocos adjacentes. Os eventos tectônicos foram separados do mais antigo ao mais recente da seguinte forma:

- Dn – Lineamentos magnetométricos na direção NW-SE, dúctil;

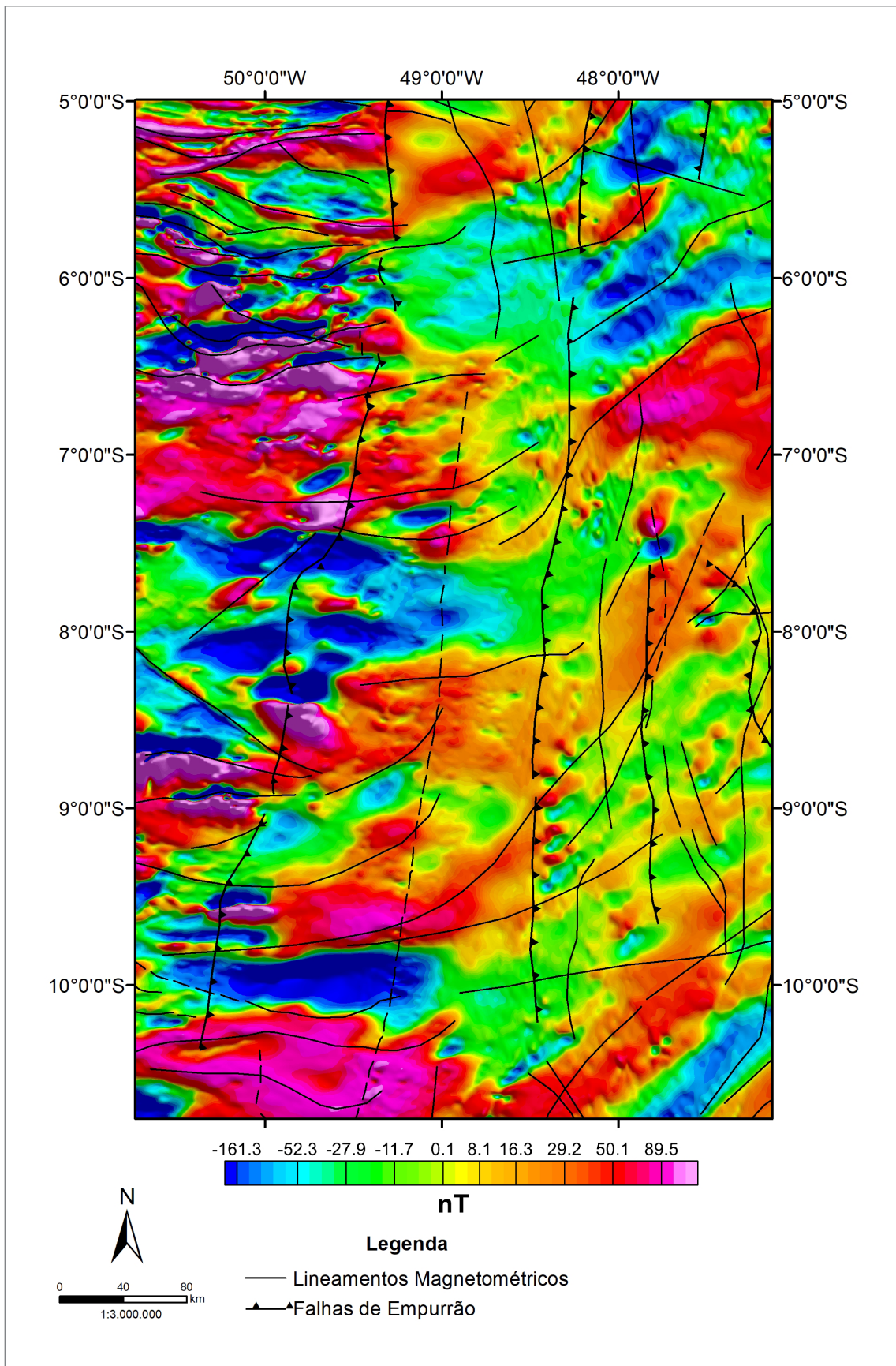


Figura 12 – Imagem do campo magnético anômalo (CMA) com as principais estruturas magnéticas interpretadas.
 Fonte: elaborado pelos autores.

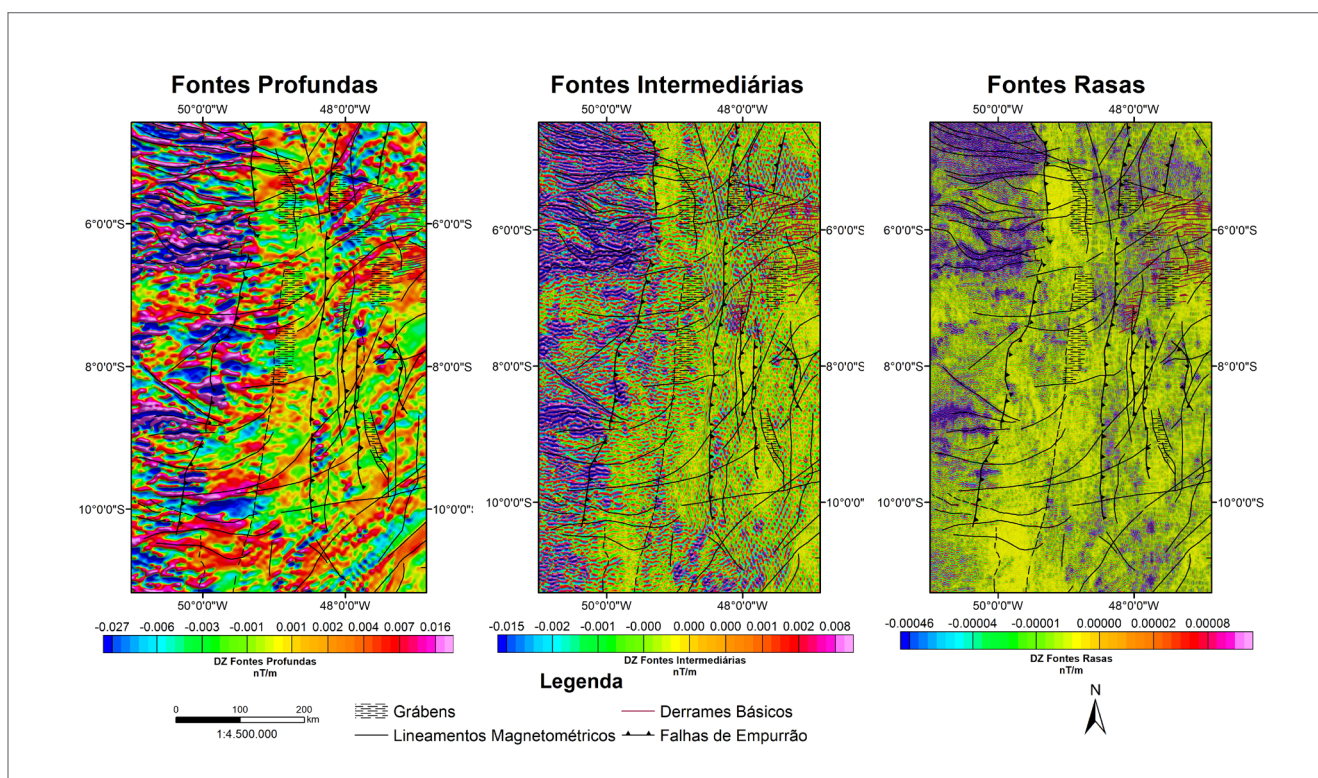


Figura 13 – Da esquerda para a direita: mapas processados a partir do CMA com filtros passa-banda sobrepostos aos principais lineamentos e estruturas magnéticas. À esquerda, imagem das fontes magnéticas profundas (>8.600 m); no centro, imagem das fontes intermediárias (2.200 – 8.600 m) e, à direita, imagem das fontes rasas (<2.200 m). Fonte: elaborado pelos autores.

- Dn+1 – Lineamentos magnetométricos na direção E-W, ENE-WSW, NE-SW, Dúctil – rúptil;
- Dn+2 - Lineamentos magnetométricos na direção N-S, dúctil– rúptil, Faixa Araguaia;
- Dn+3 – Lineamentos magnetométricos na direção NE-SW, dúctil–rúptil, LTB;
- Dn+4 - Lineamentos magnetométricos na direção NNW, NNE, rúptil;
- Diques – NS e EW, pouco frequentes.

As soluções da deconvolução de Euler 3D foram usadas para estimar a profundidade média das fontes magnéticas calibradas, para identificar os limites dos corpos e suas respectivas inclinações. Realçando as soluções rasas, foi possível delimitar os derrames básicos no interior da bacia e, agrupando as soluções mais profundas, destacar as estruturas do embasamento.

A deconvolução de Euler, para a interpretação quantitativa em três direções de um conjunto de anomalias, é um procedimento integrado da localização das fontes magnéticas por meio da relação de homogeneidade de Euler para campos potenciais (Sordi, 2007).

Variando alguns parâmetros, como o índice estrutural, a janela e a tolerância das fontes magnéticas, foi possível observar soluções de diferentes geometrias e individualizar as feições lineares ou os corpos geológicos distintos. Na Figura 15, as soluções magnéticas

agrupadas, com índice estrutural 0, tolerância 10 e janela 10, apresentam profundidade acima de 5 km, sendo compatíveis com as feições lineares dos principais lineamentos magnetométricos, principalmente nas partes leste e sudeste, o que mostra as fontes magnéticas sugestivas aos derrames básicos.

A imagem da deconvolução de Euler, usando o índice estrutural 3, tolerância 5 e janela 10 (Figura 16), apresentou agrupamento das fontes magnéticas com profundidade aproximada entre 5 e 10 km. As soluções de cor azul, s próximas ao topo do embasamento da bacia a leste e no centro-leste, estão agrupadas na direção N-S e coincidem com a região dos metassedimentos (Grupo Estrondo) da Faixa Araguaia. Na parte oeste, as estruturas são lineares e se correlacionam com as do CA, porém algumas seguem para leste até a bacia.

Na região noroeste do projeto, foi selecionada uma subárea para a geração de soluções com janelas mais precisas, onde observou-se que as soluções do topo das fontes magnéticas são coincidentes com os grabens alinhados N-S e os lineamentos magnetométricos interpretados, conforme pode ser visto nas imagens da Figura 17. A profundidade dos grabens nessa área específica foi estimada em aproximadamente 1.200 - 1.300 m. Para delimitar os grabens, realizou-se a interpolação de fatias horizontais do bloco tridimensional de *Magnetization Vector Inversion* (MVI),

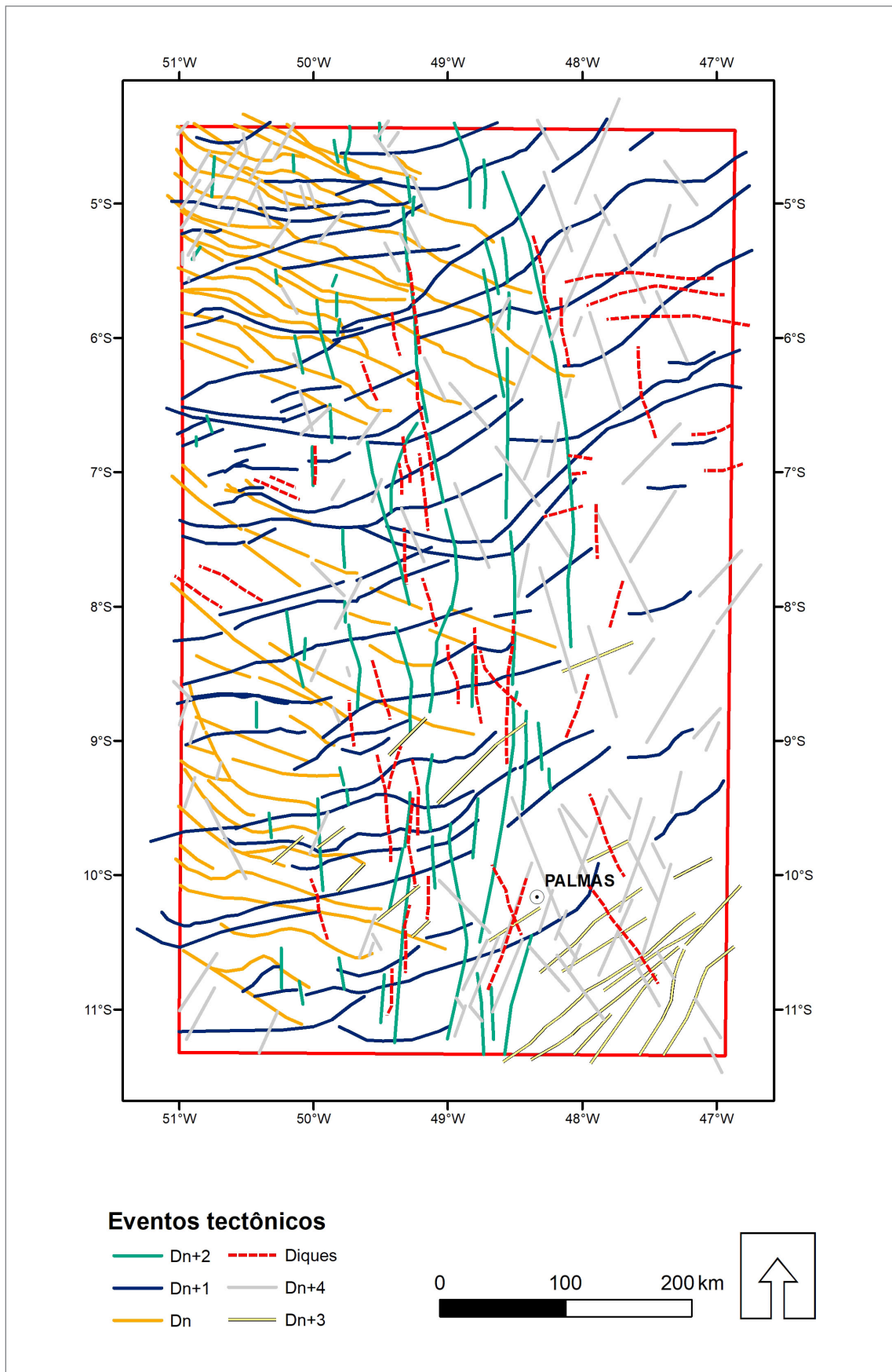


Figura 14 – Lineamentos magnetométricos separados em eventos tectônicos do mais antigo ao mais recente.
 Fonte: elaborado pelos autores.

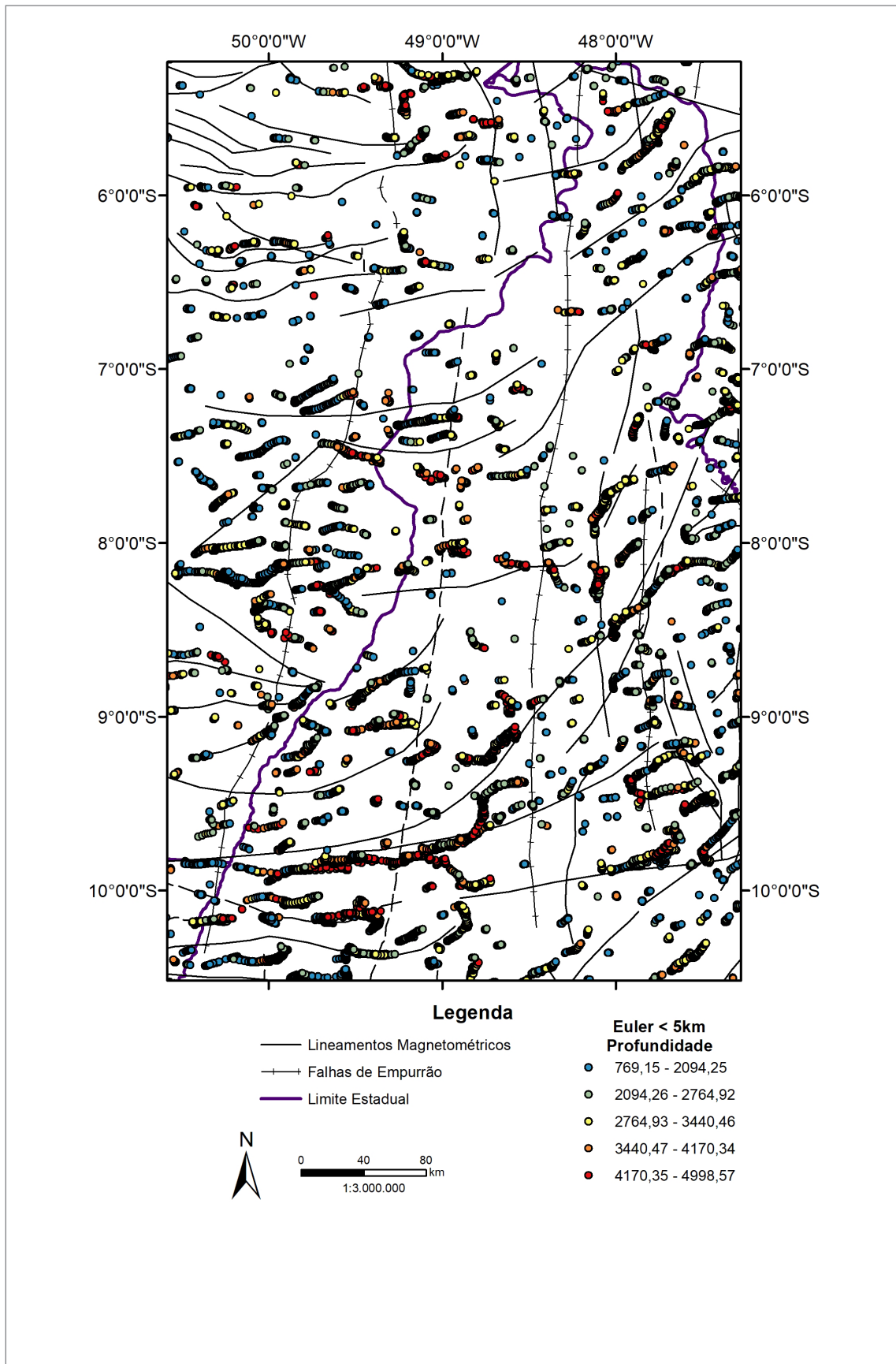


Figura 15 – Imagem da deconvolução de Euler com índice estrutural 0, tolerância 10 e janela 10, realçando estruturas com menos de 5 km. Fonte: elaborado pelos autores.

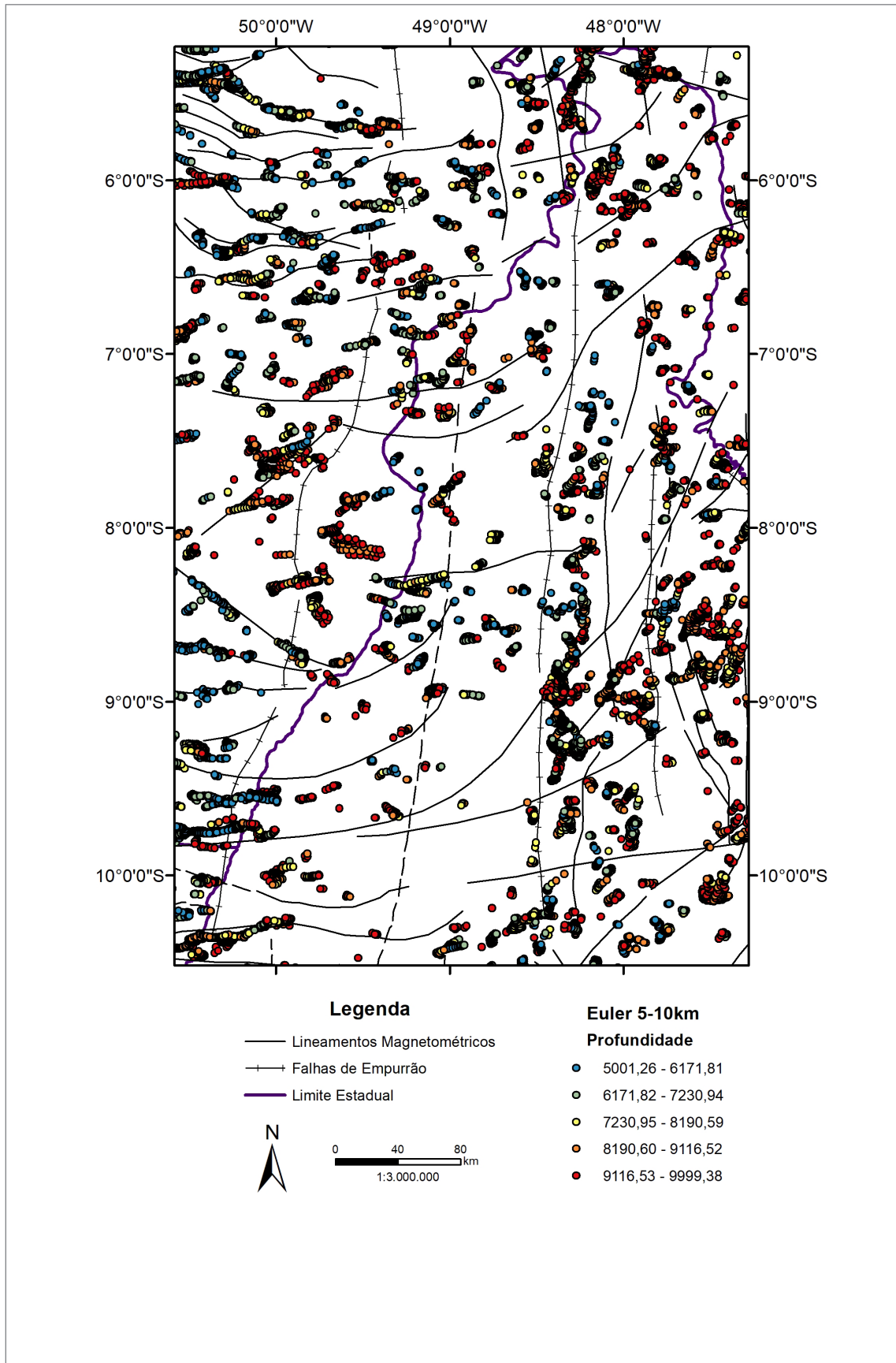


Figura 16 – Imagem da deconvolução de Euler, com índice estrutural 3, tolerância 5 e janela 10 com profundidade entre 5 e 10 km, sobreposta às estruturas magnéticas. Fonte: Elaborado pelos autores.

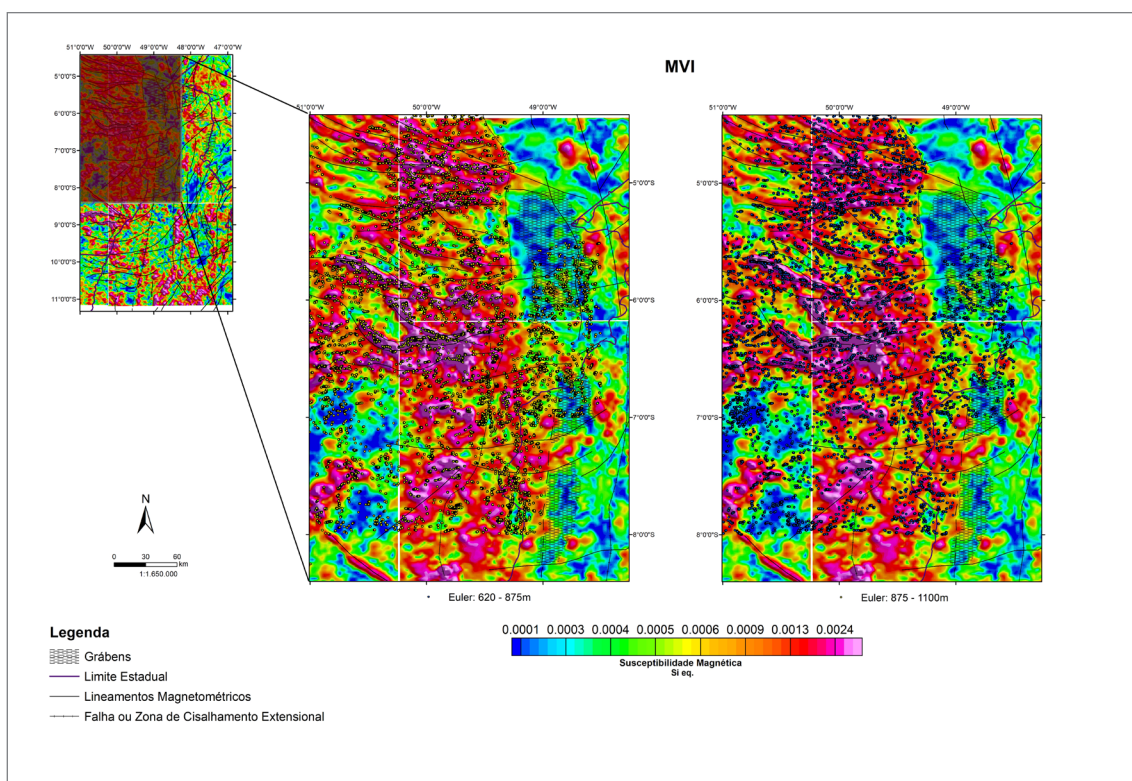


Figura 17 – Processamento MVI na subárea na região noroeste do projeto, com as soluções da deconvolução de Euler divididas por profundidade e sobrepostas aos lineamentos magnetométricos, às estruturas e aos grabens interpretados. Fonte: elaborado pelos autores.

que foram extraídas de blocos com 1.500 m x 1.500 m e variação de profundidade de 750 metros.

Utilizando as soluções da deconvolução de Euler, seccionadas em diferentes profundidades, foi indicada a continuação das estruturas magnetométricas do embasamento do Cráton Amazônico, por baixo das rochas metassedimentares da Faixa Araguaia. Essas estruturas estão alinhadas predominantemente nas direções E-W e ENE-WSW e apresentam um caimento em direção ao sul.

As imagens da superfície Curie, principalmente com espaçamento de 250 km x 250 km, mostrou que o topo do embasamento magnético sugere correlação com algumas feições estruturais já comentadas acima. Na parte noroeste do projeto, há uma estruturação mais rasa no Cráton Amazônico (NW-SE). Na região sudeste, existem feições do embasamento magnético coincidentes com as grandes estruturas do LTB (NE-SW), Figura 18. Além disso, na parte leste da imagem, na Bacia do Parnaíba, observa-se uma maior profundidade do embasamento magnético e os derrames básicos, com estruturação magnética mais superficial, na parte nordeste do projeto.

O *trend* anômalo de direção N-S, já comentado, que caracteriza a Faixa Araguaia (FA), é definido por um padrão composto por anomalias gravimétricas alternadas de amplitudes positivas e negativas alongadas, que distinguem gravimetricamente a FA do Cráton Amazônico (CA). Esse

padrão mostra continuidade sob a cobertura sedimentar fanerozoica em relação à Bacia do Parnaíba. Essa observação pode ser um elemento tectônico importante a ser investigado, a fim de estabelecer uma analogia com o interior profundo da bacia e para o estudo de feições originárias do Cráton Amazônico. Essas feições são remanescentes do truncamento do *trend* Araguaia por estruturas mais antigas e encobertas pelos sedimentos da bacia.

É sabido que a resolução dos dados de satélites é inferior à dos dados aéreos. Apesar desse fato, as grandes e médias estruturas são claramente delimitadas na Figura 19, no mapa gravimétrico de satélite (GRACE) da anomalia ar-livre e os três principais domínios geológicos da área de estudo: Cráton Amazônico (CA), Faixa Araguaia (FA), a região com rochas metassedimentares e de maior densidade do Grupo Estrondo (NS), e a região da Bacia do Parnaíba (BPAR).

De acordo com a imagem gravimétrica da anomalia ar-livre, a Bacia do Parnaíba é associada a uma região de baixa densidade, com áreas de relevo gravimétrico variado e limitada por anomalias gravimétricas positivas na sua borda (NS), sugerindo que a borda oeste da Bacia do Parnaíba foi formada por diversos blocos crustais e que, provavelmente, as rochas mais densas da FA também estejam abaixo da BPar, pelo menos na sua borda oeste. As anomalias gravimétricas e as tendências magnéticas sugerem que os

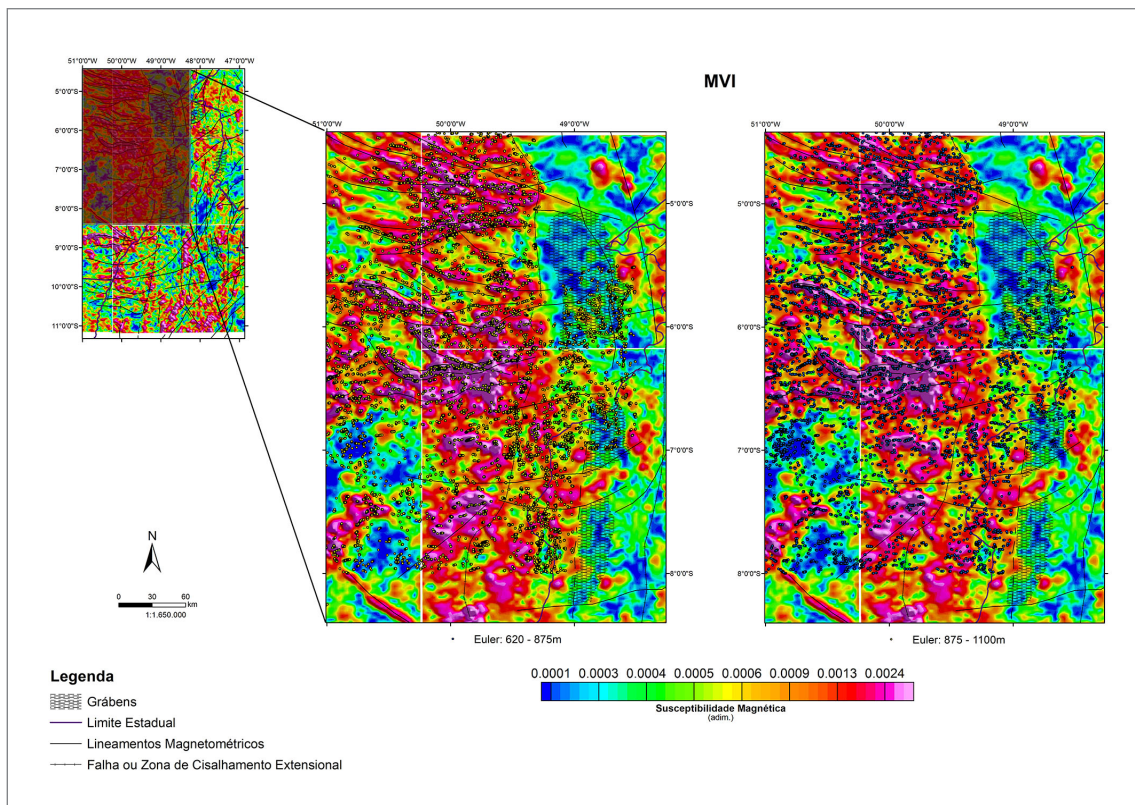


Figura 18 -- Imagens da superfície Curie com sobreposição de estruturas e derrames magnéticos.
 Fonte: elaborado pelos autores.

cinturões continuam abaixo da bacia (Soares *et al.*, 2006; Ussami; Molina; Medeiros, 1999).

Na parte norte do projeto, existem baixos gravimétricos nas regiões onde os grabens foram evidenciados na magnetometria, porém, na parte central da FA, onde estão as rochas do Grupo Tocantins, existe uma anomalia gravimétrica negativa extremamente forte. Segundo Cordani *et al.* (1984), os baixos valores gravimétricos podem ocultar anomalias semelhantes a grabens.

Ainda existem estruturas WNW-ESE e ENE-WSW, que são evidentes nos mapas gravimétricos, que cortam toda área do projeto, indicando pelo menos as duas tendências de direção da calha de deposição da bacia (embasamento). Existem algumas estruturas NE-SW, na região da BPar, menos evidentes. De qualquer forma, na magnetometria, o Lineamento Transbrasiliano exibe forte expressão dos seus lineamentos e exerce uma forte influência na Faixa Araguaia, controlando suas estruturas, distribuição de intrusões e derrames na BPar, além de desempenhar um papel importante nas interações tectônicas da região.

O perfil sísmico da transecta apresenta feições importantes, marcadas com setas azuis no perfil da Figura 20, que foram corroboradas com as interpretações de imagens geradas a partir de dados magnetométricos e gravimétricos, além de um vínculo com um furo de sondagem na

Bacia do Parnaíba. As setas azuis, a leste, são intrusões básicas marcadas na bacia, indicando as posições onde são observadas as estruturas grabeniformes.

No perfil sísmico, os limites dos grabens Marabá e Estrondo são bem definidos, bem como os limites coincidentes com as imagens magnetométricas. O furo de sondagem encontrou o topo do embasamento a 2.176 metros, ajudando a validar a interpretação sísmica do embasamento da Bacia do Parnaíba. A interface entre o pacote sedimentar e o embasamento é bem definida por um refletor no perfil sísmico. As estruturas grabeniformes sotopostas à seção paleozoica são causadas pela heterogeneidade e anisotropia do embasamento.

Utilizando as informações interpretadas dos métodos potenciais e do perfil sísmico associado com as imagens dos métodos potenciais, foi possível delimitar outros grabens com mais precisão, além dos conhecidos grabens Marabá e Estrondo, anteriormente ressaltados, como é observado na Figura 21.

A partir das interpretações geofísicas regionais dos diferentes métodos potenciais, foram confeccionados mapas de domínios para construção do modelo do arcabouço estrutural dos limites oeste da Bacia do Parnaíba. Correlacionando os grandes domínios tectônicos e litotratigráficos, comparados com os extraídos do método gamaespectrométrico (Figura 22), magnetométrico (Figura

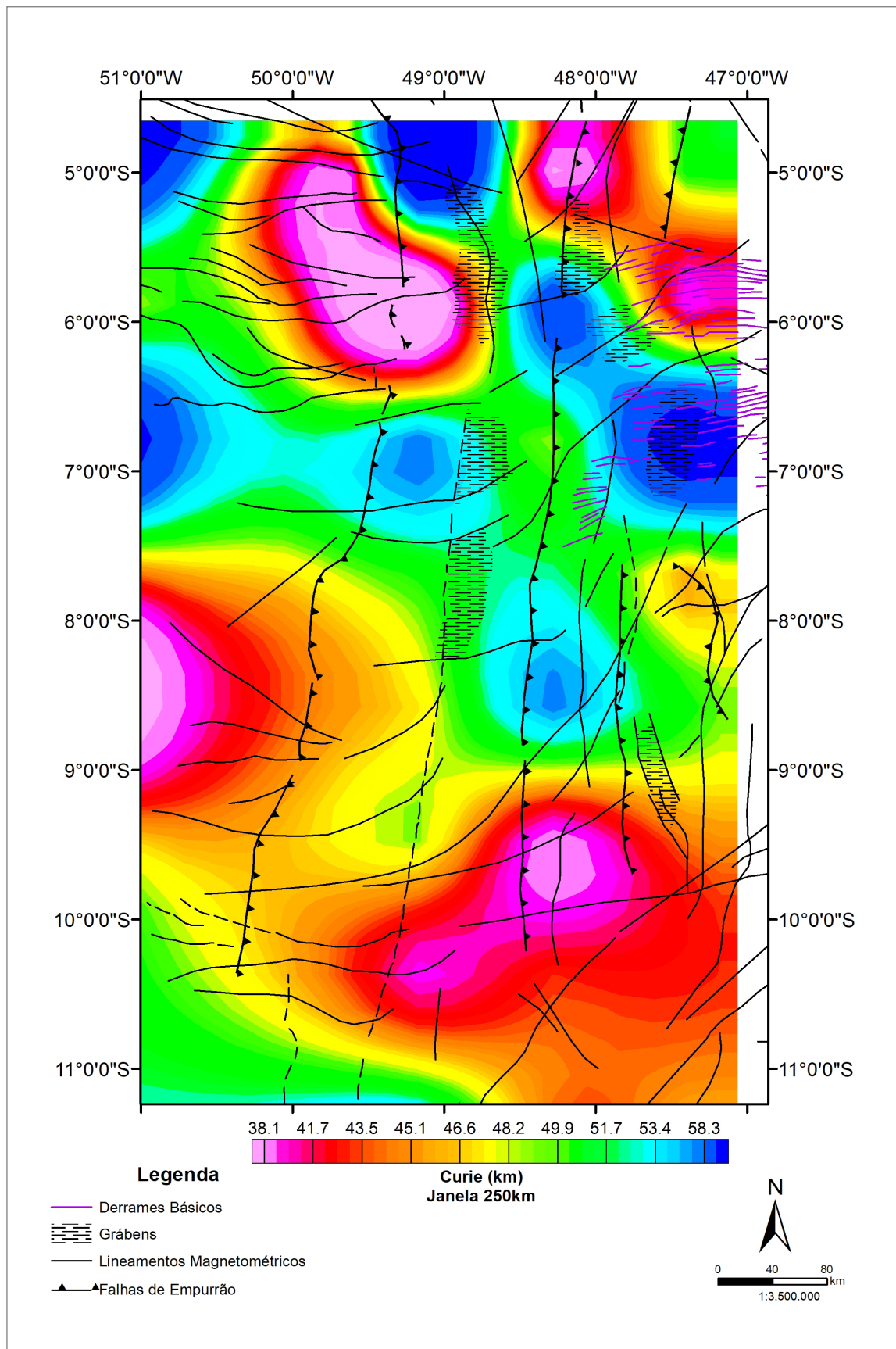


Figura 19 – Grandes domínios no mapa gravimétrico de satélite (GRACE) da anomalia ar-livre, da esquerda para direita: Cráton Amazônico (CA); Faixa Araguaia (FA); metassedimentos e rochas mais densas e Bacia do Parnaíba (BPAR).
Fonte: elaborado pelos autores.

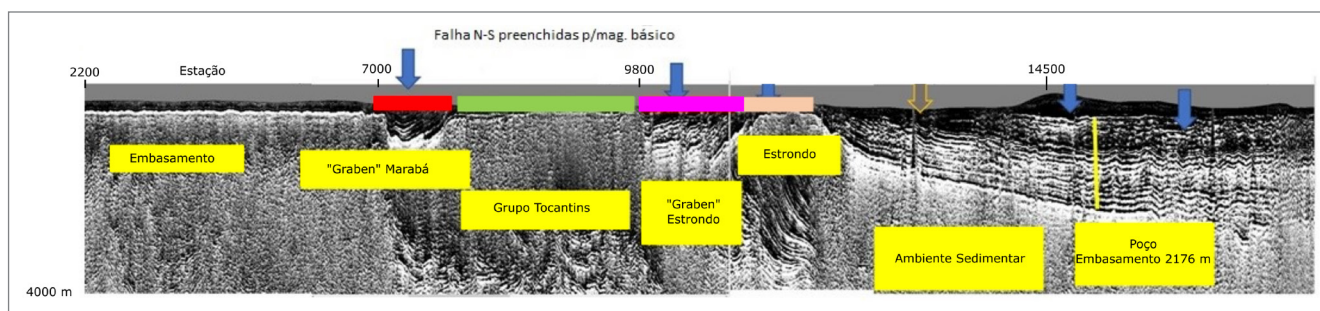


Figura 20 – Perfil sísmico com a marcação das estruturas grabeniformes, limites dos ambientes e grupos geológicos, além da posição do furo de sondagem e intrusões básicas. Fonte: elaborado pelos autores.

23) e gravimétrico (Figura 24), alcançou-se o arcabouço tectônico interpretado (Figura 25).

A Figura 22 exibe seis diferentes domínios gamaespectrométricos, que foram separados pela variação dos valores de radiação e seus contrastes, e correlacionados com os grandes domínios estratigráficos conhecidos. Destaque para diferenciação das rochas do Grupo Estrondo (NS).

Na Figura 23, além dos lineamentos magnéticos e os derrames básicos já ressaltados anteriormente, foi inferida a localização de corpos máficos e ultramáficos na região da FA e na borda oeste da BPar.

A Figura 24 apresenta seis domínios gravimétricos diferenciados pelo contraste de densidade e correlacionados com os blocos estratigráficos. Ênfase para o baixo Redenção, no centro da área na FA, e a presença de rochas máficas e ultramáficas de alta densidade no interior da bacia, além da sua diferenciação de densidade com cores mais claras no limite leste da imagem.

A Figura 25 representa a integração dos três métodos potenciais na confecção de um modelo de arcabouço estrutural da borda oeste da Bacia do Paranaíba com vários altos estruturais.

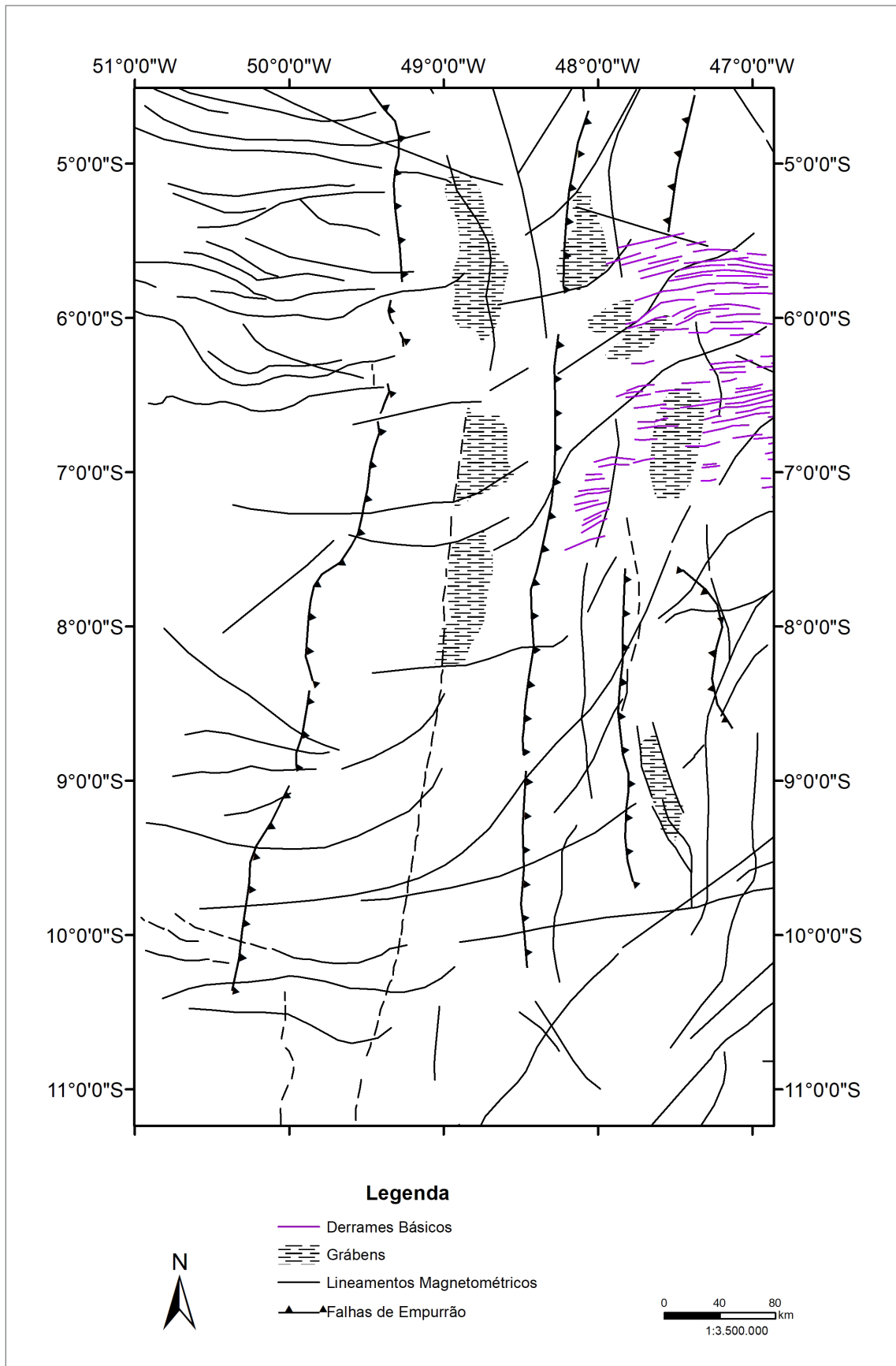


Figura 21 – Interpretações dos lineamentos magnetométricos, regiões dos grabens e derrames básicos do projeto.
 Fonte: elaborado pelos autores.

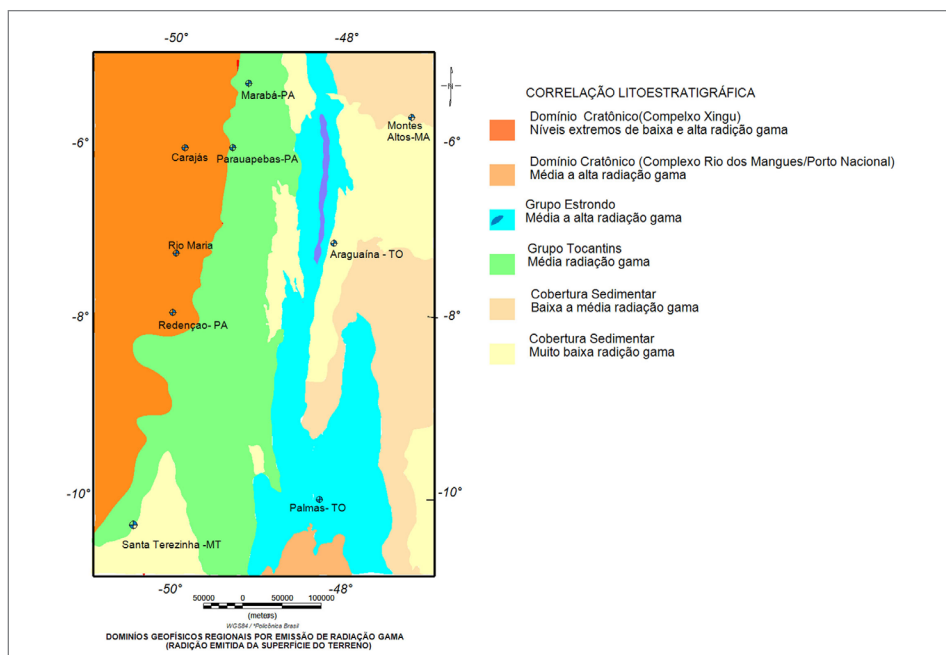


Figura 22 – Imagem interpretativa dos dados radiométricos com domínios gamaespectrométricos correlacionados com os domínios estratigráficos. Fonte: elaborado pelos autores.

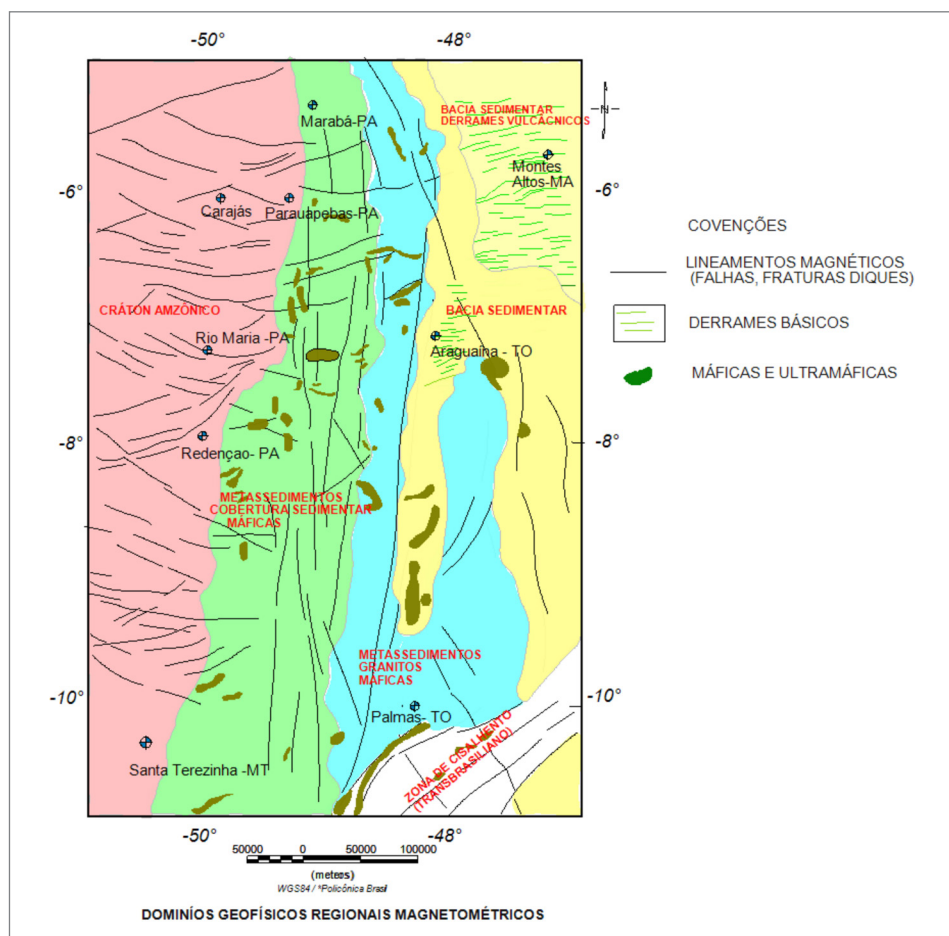


Figura 23 – Imagem interpretativa dos dados magnetométricos com domínios, lineamentos magnéticos, derrames básicos e rochas máficas e ultramáficas correlacionados com os domínios estratigráficos. Fonte: elaborado pelos autores.

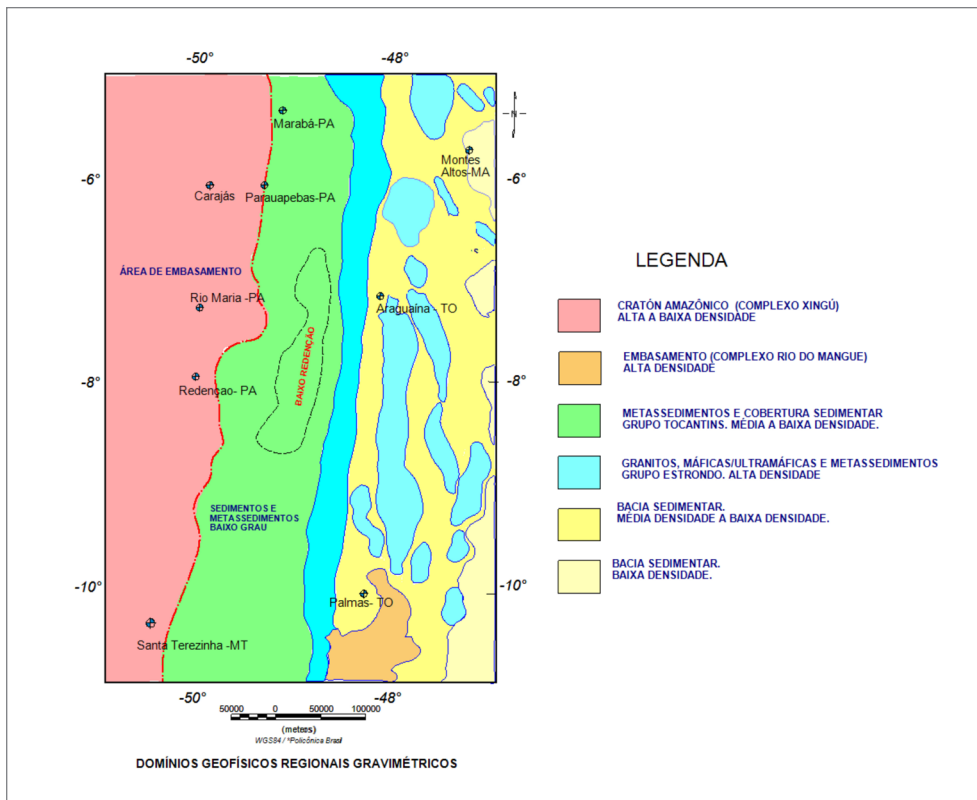


Figura 24 – Imagem interpretativa dos dados gravimétricos com os domínios correlacionados com os blocos estratigráficos. Fonte: elaborado pelos autores.

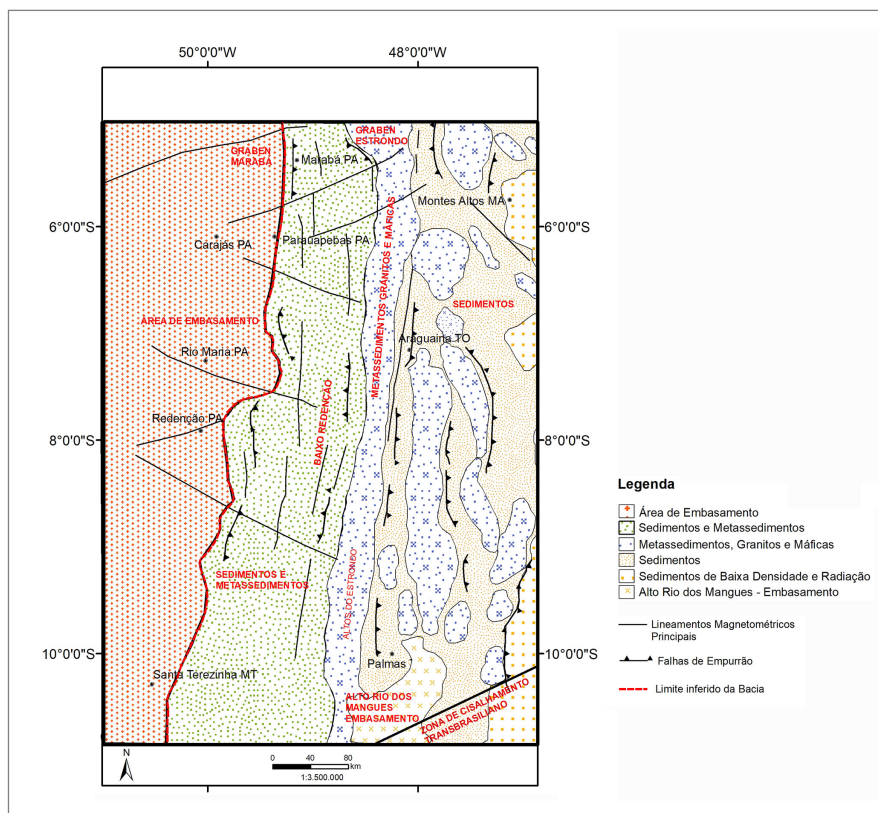


Figura 25 – Imagem integrada das interpretações dos métodos potenciais do projeto borda oeste da Bacia do Parnaíba, com o arcabouço tectônico. Fonte: elaborado pelos autores.

6. CONCLUSÕES

A área de estudo apresenta uma enorme extensão englobando vários blocos tectônicos divergentes na sua gênese e tipos de rochas. A interação desses grandes domínios gerou características muito particulares e os eventos tectônicos adjacentes influenciaram os estágios de formação da BPar.

A BPar possui características muito relevantes, além de fazer limite com uma das províncias minerais mais importantes do mundo e apresentar comprovado potencial econômico na prospecção de gás. Sua posição entre os crátons Amazônico e São Francisco e outros importantes blocos fez com que os diferentes estágios da formação da Bacia do Parnaíba gerassem ambientes característicos com variados *trends* estruturais. Esses episódios foram diferenciados em várias fases deformacionais, conforme a reologia dúctil-rúptil e as direções preferenciais.

Vários processamentos foram realizados para melhorar a resolução dos aerolevantamentos e, principalmente, integrá-los. O processamento dos dados aerogeofísicos magnetométricos e radiométricos conseguiu unir informações de vários levantamentos de alta resolução.

Na região noroeste da área de estudo, foi selecionada uma subárea devido à maior quantidade de informações, objetivando compreender a geometria e os limites das estruturas grabeniformes e os lineamentos magnéticos com direção de NW-SE para E-W até NE-SW, de oeste para leste. Os grabens evidenciados foram denominados de Marabá e do Estrondo, confirmados pelas imagens sísmicas. Enxames de diques, no limite entre a bacia e a Faixa Araguaia, estão alinhados N-S.

Usando o processamento do MVI e da deconvolução de Euler, foi possível definir a profundidade aproximada de 1.200 metros para esses grabens e, juntamente com as imagens gravimétricas, foram estabelecidas as regiões de alcance, encaixadas N-S.

A integração dos dados geofísicos possibilitou a delimitação de inúmeros corpos com características específicas. As determinações de domínios geofísicos usaram informações de contraste de diferentes propriedades físicas, como magnetismo, gravimetria e radiometria. As interpretações podem ajudar na cartografia geológica e na descoberta de áreas prospectáveis.

Os mapas interpretativos apresentaram informações, como o traçado dos lineamentos magnéticos e as estruturas magnéticas, as regiões com derrames básicos (E-W), a geometria dos grabens, os corpos máficos e ultramáficos e o arcabouço estrutural interpretado da região.

Durante o processo de fechamento do Cráton Amazônico, ocorreram movimentos de convergência entre os blocos crustais.

Esses movimentos de convergência levaram ao fechamento do Cráton Amazônico, resultando em deformações tectônicas e formação de estruturas dobradas, falhadas e fraturadas (Castro *et al.*, 2014). À medida que o Cráton Amazônico se fechava, as estruturas resultantes eram transmitidas para a área da BPar, influenciando a distribuição dos depósitos sedimentares. A Faixa Araguaia foi empurrada contra o Cráton Amazônico, devido à ação das forças tectônicas compressivas, que geram um encurtamento horizontal, resultando em deformações e compressão, gerando as estruturas N-S.

O Lineamento Transbrasiliano exerceu, posteriormente, uma forte influência tanto na Bacia do Parnaíba quanto na Faixa Araguaia, controlando sua estrutura na distribuição de intrusões e derrames. Além disso, desempenhou um papel importante nas interações tectônicas da região. As estruturas magnetométricas interpretadas, que se estendem da CA até a borda oeste da Bacia do Parnaíba, iniciam com o trend NW-SE e transacionam até o interior da bacia com direção NE-SW, sugerindo uma forte influência do Lineamento Transbrasiliano.

Após a fase brasileira, as zonas profundas de cisalhamento foram reativadas como falhas normais, o que permitiu a implantação das estruturas grabeniformes (Cunha, 1986; Oliveira; Mohriak, 2003). Segundo (Góes, 1995), o sistema de riftes exerceu controle estrutural no Magmatismo Mosquito e podem estar embutidos e orientados por grabens alinhados sobre a área do Arco Xambioá.

Como foi discutido anteriormente, as informações levantadas indicam que o assoalho da bacia é formado por uma grande contribuição das rochas do Cráton Amazônico (CA), que mergulham abaixo dos sedimentos depositados passando pela FA até a parte oeste da BPar. É provável que a estrutura Xambioá teve contribuição na entrada de fluidos na bacia, devido seu *trend* E-W, passando para ENE, ser coincidente com os lineamentos magnetométricos observados nas imagens interpretadas. Os derrames basálticos são fortemente influenciados por essas estruturas, o que corrobora para esse raciocínio de que houve contribuição de fluidos do CA nas rochas da bacia, o que pode indicar a presença de depósitos metálicos.

O projeto-piloto demonstrou que a integração dos dados geofísicos em regiões de borda de bacias pode trazer uma visão mais ampliada dos limites dos grandes blocos tectônicos, o que motiva a busca pelo conhecimento dos processos que formam esses terrenos. O Brasil possui várias bacias intracratônicas que podem ser estudadas com essa metodologia.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. A. M.; LESQUER, A. Considerações sobre o pré-cambriano da região sul-sudoeste do Cráton São Luís. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 2., 1985, Belém. **Anais [...]**. Belém: SBG, 1985. v. 1, p. 7-21.
- ABREU, N. C.; NERY AMARAL, D.; ANDRADE, C. N. L.; OLIVEIRA, M. O.; SEVERIANO RIBEIRO, H. J. P.; CERQUEIRA, J. R.; QUEIROZ, A. F. S.; GARCIA, K. S. Paleoambiente deposicional de folhelhos da seção Neo-Devoniana da Formação Pimenteiras, borda oeste da Bacia do Parnaíba. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA*, 17., 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: SBGq, 2019. p. 42.
- AGUIAR, F. G. Revisão geológica da bacia paleozóica do Parnaíba. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 25., São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: SBG, 1971. v.3, p. 113-122.
- ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B.; CARNEIRO, C. D. R. The origin and evolution of the South American platform. **Earth Science Review**, v. 50, p. 77-111, 2000.
- ALVARENGA, C. J. S., MOURA, C. A. V.; GORAYEB, P. S. S.; DE ABREU, F. A. M. Paraguay and Araguaia Belts. *In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, 2000. p. 183-193.
- ANP (Brasil). **Bacia do Parnaíba**: sumário geológico e setores em oferta décima terceira rodada de licitações de petróleo e gás. Brasil: ANP, 2015. 23 p.
- ANP (Brasil); UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Aerolevantamentos Bacia do Parnaíba, área Parnaíba**: levantamentos aerogeofísicos para a identificação de áreas com ocorrência potencial de petróleo e gás na Bacia do Parnaíba. São Paulo: ANP; USP, 2006. II. 280 p. Tomo II, v. 1.
- BLUM, M. L. B. **Superfície Curie da Região Central de Goiás e relações com geologia, geotectônica e recursos minerais**. 1995. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 1995.
- BRITO NEVES, B. B., SANTOS, E. J.; SCHMUS, W. R. V. 2000. Tectonic History of the Borborema Province. *In: CORDANI, U.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. de A. (org.). Tectonic evolution of south America*. Rio de Janeiro: 31° International Geological Congress, 2000.
- CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do grupo Serra Grande - Bacia do Parnaíba. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SGB, 1984. v. 2. p.740-753.
- CASTELO BRANCO, R. M. G.; COIMBRA, A. M. Contribuição ao conhecimento tecto-magmático da borda sul da bacia do Parnaíba. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 33., Rio de Janeiro. **Resumos [...]**. Rio de Janeiro: SBG, 1984. p. 94.
- CASTRO, D. L.; FUCK, R. A.; PHILLIPS, J. D.; VIDOTTI, R. M.; BEZERRA, F. H. R.; DANTAS, E. L. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 128-145, 2014.
- CHEESMAN, S.; MACLEOD, I.; HOLLYER, G. Um novo algoritmo de costura de grade automatizado, rápido e automatizado. **Exploration Geophysics**, 1998, v. 29, n. 3-4, p. 301-305.
- CORDANI, U. G.; BRITO NEVES, B. B. de; FUCK, R. A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F. M. B. **Estudo preliminar de integração do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Ciência. Técnica. Petróleo. Seção: exploração de petróleo, n. 14, p. 1-70, 1984. Tradução. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/5ea9e6a1-ecc1-4565-8b7f-a0244ae32545/1464085.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.
- CORDANI, U.; PIMENTEL, M. M.; ARAÚJO, C. E. G. de; FUCK, R. A. The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 3, set. 2013.
- CORREA, R. T. **Superfície Curie da província Borborema**. 2015. xii, 65 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- COSTA, J. B. S., BORGES, M. S., IGREJA, H.L.S., HASUI, Y. Aspectos da evolução tectônica da Bacia do Parnaíba e sua relação com o arcabouço pré-cambriano. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTONICOS*, 3., 1991, Rio Claro. **Boletim de Resumos [...]**. Rio Claro: SBG-Núcleo São Paulo, 1991. p. 96-98.
- COSTA, C. M.; DE SORDI, D.; AZEVEDO, M. L. V.; MUNIS, M. B.; BEZERRA, J. R. L.; RUGENSKI, A.; ALVES, R. A.; VIEIRA, V. A.; SILVEIRA, R. L.; ALMEIDA, S. H. **Projeto Aeromag Brasil**. Brasília, CPRM, 2010. Escala 1:6.000.000.
- COSTA, J. B. S.; GORAYEB, P. S. S.; HASUI, Y. Relações estruturais entre a Faixa Araguaia e o Maciço Goiano na região de Paraíso do Norte – Gurupi - GO. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35., 1988, Belém. **Anais [...]**. SBG, 1988. v. 5. p. 2187-2196.
- CUNHA, F. M. B. **Evolução paleozóica da bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico**. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1986. 107 p.
- DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, D. C.; GUIMARÃES, F. V.; GABRIEL, E. O.; FEIO, G. R. L.; LAMARÃO, C. N.; ALTHOFF, F. J.; SANTOS, P. A.; TEIXEIRA, M. F. B.; SILVA,

- A. C.; RODRIGUES, D. S.; SANTOS, M. J. P.; SILVA, C. R. P.; SANTOS, R. D.; SANTOS, P. J. L. Geologia do subdomínio de transição do Domínio Carajás – Implicações para a evolução arqueana da Província Carajás - Pará. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 13., 2013, Belém. **Anais** [...]. Belém: SBG, 2013.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogenéticas. *In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM, 2003. Escala 1:2.500.000. Sistema de Informações Geográficas - SIG. cap. 7, p. 365-378. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/5006>. Acesso em: 24 out. 2023.
- GÓES, A. M. **Formação Poti (Carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba**. 1995. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. DOI: 10.11606/T.44.1995.tde-11022014-105309. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-11022014-105309/pt-br.php>. Acesso em: 10 out. 2023.
- GORAYEB, P.S.S. **Petrologia e evolução crustal das rochas de alto grau de Porto Nacional – TO**. 1996. 258 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.
- GORAYEB, P. S. S.; MOURA, C. A. V.; ABREU, F. A. M. Geologia do Parque Estadual da Serra dos Martírios-Andorinhas e região adjacente. *In: GORAYEB, P. S. S. (org.). Parque Martírios-Andorinhas: conhecimento, história e preservação*. Belém: EDUFPA, 2008. p. 54-75.
- HASTINGS, D. A.; DUNBAR, P. K.; Elphinstone, G. M.; Bootz, M.; Murakami, II; Maruyama, H.; Masaharu, II; Holland, P.; Payne, J.; Bryant, N. A.; Logan, T.; Muller, J. P.; Schreier, G.; MacDonald, J. S. (ed.). **The global land one-kilometer base elevation (GLOBE) digital elevation model, version 1.0**. Colorado: National Geophysical Data Center, 1999. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>. Acesso em: 24 out. 2023.
- HASUI, Y.; ABREU, F. A. M.; VILLAS, R. N. N. Província Parnaíba. *In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Coord.). O Pré-Cambriano no Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. p. 36-45.
- HASUI, Y.; HARALYI, N. L. E. Aspectos lito-estruturais e geofísicos do soerguimento do Alto Paranaíba. **Geociências**, São Paulo, v. 10, p. 57-77, 1991.
- HINZE, W. J.; VON FRESE, R. R. B.; SAAD, A. H. **Gravity and magnetic exploration: principles, practices, and applications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013. p 130.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. 3rd edition. Oxford: Wiley-Blackwell Science Ltd, 2002. 281p.
- KLEIN, E. L.; LOPES, E. C. dos S.; CHAVES, C. L. (org.). **Geologia e recursos minerais da folha Santa Luzia do Pará, SA.23-V-C-VI**: estado do Pará. Belém: CPRM, 2015. Escala 1:100.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21286>. Acesso em: 26 out. 2023.
- LIMA, E. de A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética, relatório final da etapa III**. Recife, PE: DNPM/CPRM, 1978. 4 v. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/9382>. Acesso em: 10 out. 2023
- MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 7, p 263-288, 1995.
- MACLEOD, C.; COHEN, I. L. Anxiety and the interpretation of ambiguity: a text comprehension study. **Journal of Abnormal Psychology**, v. 102, n. 2, p. 238–247, 1993.
- MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A. Sedimentary basins of south America. *In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, 2000. p. 389-449.
- MOCITAIBA, L. S. R.; CASTRO, D. L. de; OLIVEIRA, D. C de. Cartografia geofísica regional do magmatismo mesozoico da Bacia do Parnaíba. **Revista do Instituto de Geociências, Geol. USP, Sér. Cient.**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 169-192, jun. 2017.
- OLIVEIRA, D. C. de; MOHRIAK, W. U. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 20, p. 351-383, 2003.
- OLIVEIRA, J. K. M. de. **Caracterização estrutural da borda sudeste do sistema transcorrente Carajás com ênfase nas rochas do terreno granítico-gnáissico**. 2002. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/368>. Acesso em: 10 out. 2023.
- PAIXÃO, M. A. P.; NILSON, A. A.; DANTAS, E. L. The Neo-proterozoic Quatipuru ophiolite and the Araguaia fold belt, central-northern Brazil, compared with correlatives in NW Africa. *In: PANKHURST, R.J.; TROUW, R. A. J.; BRITO NEVES, B. B.; WIT, M. J. de (ed.). West Gondwana: pre-cenozoic correlations across the south atlanc region*. London: The Geological Society of London, 2008. p. 297–318. (Geological Society Special Publication, n 10 out. 2023. 294).
- REZENDE, N. G. A. M. **A zona zeolítica da Formação Corda, Bacia do Parnaíba**. 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/15254>. Acesso em: 10 out. 2023.
- REZENDE, W. M.; PAMPLONA, H. R. P. Estudo do desenvolvimento do Arco Ferrer-Urbano

Santos. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1/2, p. 5-14, 1970.

RODRIGUES, R. A. **Geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba**. 1995. 255 f. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

SANTOS, J. O. S. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. *In*: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003. Escala 1:2.500.000. Sistema de Informações Geográficas – SIG. cap. 4, p. 169-226. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/5006>. Acesso em: 24 out. 2023.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A. A evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. *In*: SCHOBENHAUS, C. (coord.). **Geologia do Brasil**. Brasília: DNPM, 1984. p. 09-53.

SOARES, J. P.; BERROCAL, J.; FUCK, R. A.; MOONEY, W.; VENTURA, D. B. R. Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: a deep seismic refraction study. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, B12302, 2006.

SORDI, D. A. **Aerogeofísica aplicada à compreensão do sistema de empurrões da sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil Central**. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SZATMARI, P.; FRANÇOLIN, J. B. L.; ZANOTTO, O.; WOLFF, S. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, n. 2, p. 180-188, 1987. Disponível em: <http://big.siteoficial.ws/1987/n2/szatimari.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied eophysics**. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TROMPETTE, R. Geodynamic evolution of Western Gondwana in middle and upper Proterozoic time. *In*: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 27., 1984, Moscow. **Abstracts** [...]. Moscow: IUGS, 1984. v. II, p. 404-405.

USSAMI, N.; MOLINA, E. C.; MEDEIROS, W. E. Novos vínculos sobre a evolução térmica da margem continental leste do Brasil. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 1999. **Anais** [...]. Lencóis: SBG, 1999.

VASQUEZ M.L.; SOUSA, C.S.; CARVALHO, J.M.A. Mapa geológico do Estado do Pará – proposta e avanços. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9., Belém. **Resumos Expandidos** [...]. Belém: SBG, 2006. p. 144-148. Disponível em: [chrome-extension:https://sbg-no.org.br/arquivos/BASES/Anais%209%20Simp%20Geol%20Amaz%20Marco-2006-Belem.pdf](https://sbg-no.org.br/arquivos/BASES/Anais%209%20Simp%20Geol%20Amaz%20Marco-2006-Belem.pdf). Acesso em: 10 out. 2023.

VAZ, P. T., REZENDE, N. das G. de A. da M., WANDERLEY FILHO, J. R., TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 253-263, maio/nov. 2007.

O SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB-CPRM) E OS OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ODS

Em setembro de 2015 líderes mundiais reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, e formularam um conjunto de objetivos e metas universais com intuito de garantir o desenvolvimento sustentável nas dimensões econômica, social e ambiental. Esta ação resultou na *Agenda 2030*, a qual contém um conjunto de *17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS*.

A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade. Busca fortalecer a paz universal, e considera que a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões é o maior desafio global, e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável.

Os 17 ODS incluem uma ambiciosa lista de 169 metas para todos os países e todas as partes interessadas, atuando em parceria colaborativa, a serem cumpridas até 2030.



O Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) atua em diversas áreas intrínsecas às Geociências, que podem ser agrupadas em quatro grandes linhas de atuação:

- Geologia;
- Recursos Minerais;
- Hidrologia; e
- Gestão Territorial.

Todas as áreas de atuação do SGB-CPRM, sejam nas áreas das Geociências ou nos serviços compartilhados, ou ainda em seus programas internos, devem ter conexão com os ODS, evidenciando o comprometimento de nossa instituição com a sustentabilidade, com a humanidade e com o futuro do planeta.

A tabela a seguir relaciona as áreas de atuação do SGB-CPRM com os ODS.

Áreas de atuação do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS

ÁREA DE ATUAÇÃO GEOCIÊNCIAS

LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS



LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS



AValiação DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL



LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS MARINHOS



LEVANTAMENTOS GEOQUÍMICOS



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS



SISTEMAS DE ALERTA HIDROLÓGICO



AGROGEOLOGIA



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS



RISCO GEOLÓGICO



GEODIVERSIDADE



PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOPARQUES



ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO



GEOLOGIA MÉDICA



RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO



ÁREA DE ATUAÇÃO SERVIÇOS COMPARTILHADOS

GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO



TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO



LABORATÓRIO DE ANÁLISE MINERAIS



MUSEU DE CIÊNCIAS DA TERRA



PALEONTOLOGIA



PARCERIAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS



REDE DE BIBLIOTECAS



REDE DE LITOTECAS



GOVERNANÇA



ÁREA DE ATUAÇÃO PROGRAMAS INTERNOS

SUSTENTABILIDADE



PRÓ-EQUIDADE



COMITÊ DE ÉTICA



PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA Nº10

O conhecimento geológico do território brasileiro constitui um instrumento indispensável para o planejamento e a execução das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável dos recursos minerais, e simultaneamente é fonte de dados imprescindível para o conhecimento e gestão do meio físico.

É com essa premissa que o Serviço Geológico do Brasil – CPRM tem a grata satisfação de disponibilizar à comunidade técnico-científica, aos empresários do setor mineral e à sociedade em geral mais este produto, o Informe de Geofísica Aplicada, vinculado ao Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral.

Com os expressivos investimentos realizados nos últimos anos em Geofísica, seja na aquisição de dados aerogeofísicos, seja na aquisição de equipamentos de geofísica terrestre, trabalhos de excelente qualidade de aplicação de dados geofísicos para solução de problemas geológicos vêm sendo desenvolvidos pelos pesquisadores do SGB-CPRM.

Entendendo a importância de divulgar amplamente os trabalhos e experiências em Geofísica, foi criada esta nova linha editorial, concebida no Departamento de Geologia e na Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica, que permite aos pesquisadores explorar e apresentar de forma mais detalhada os trabalhos realizados em projetos técnicos, demonstrando a diversidade e potencialidade de aplicação da Geofísica.

Com mais este produto, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM dá continuidade à política governamental de atualizar o conhecimento geológico do país, através dos levantamentos geológicos básicos, geoquímicos e geofísicos, e da avaliação integrada das informações, fundamental para o desenvolvimento regional e importante subsídio à formulação de políticas públicas e de apoio à tomada de decisão de investimentos. Este produto está disponível para download no banco de dados corporativo do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, o GeoSGB (<http://geosgb.sgb.gov.br>), e no Repositório Institucional de Geociências-RIGEO (<http://rigeo.cprm.gov.br>)

ESTUDOS GEOFÍSICO-GEOLÓGICOS EM BORDA DE BACIAS SEDIMENTARES TERRESTRES BRASILEIRAS – ÁREA PILOTO: BORDA OESTE DA BACIA DO PARNAÍBA



SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

Sede Brasília

Setor Bancário Norte - SBN - Quadra 02, Asa Norte
Bloco H - Edifício Central Brasília - Brasília - DF - Brasil
CEP: 70040-904
Tel.: (61) 2108-8400

Escritório do Rio de Janeiro

Avenida Pasteur, 404 - Urca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
CEP: 22290-255
Tel.: (21) 2295-0032

Diretoria de Geologia e Recursos Minerais

Tel.: (21) 2546-0212 • (61) 3223-1166

Departamento de Geologia

Tels: (21) 2295-4992

Departamento de Recursos Minerais

Tel.: (21) 2295-4992

Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Tel.: (11) 3775-5123

www.sgb.gov.br

Assessoria de Comunicação

Tels: (61) 2108-8400 • (21) 2295-4641
email: asscomdf@sgb.gov.br

Ouvidoria

Tel.: (21) 2295-4697
email: ouvidoria@sgb.gov.br

Serviço de Atendimento a Usuários – SEUS

Tel.: (21) 2295-5997
email: seus@sgb.gov.br