



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Márcio Cisnaldo de Souza

**Modelagem bidimensional e interpretação geológico-estrutural com base  
em dados aerogravimétricos e aeromagnetométricos de uma área a sudeste  
da Bacia do Parnaíba**

Rio de Janeiro

2017

Márcio Cisnaldo de Souza

**Modelagem bidimensional e interpretação geológico-estrutural com base em dados aerogravimétricos e aeromagnetométricos de uma área a sudeste da Bacia do Parnaíba**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Dourado

Coorientador : Prof. Dr. Miguel Ângelo Mane

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

S729

Souza, Márcio Cisnaldo de.

Modelagem bidimensional e interpretação geológico-estrutural com base em dados aerogravimétricos e aeromagnetométricos de uma área a sudeste da Bacia do Parnaíba / Márcio Cisnaldo de Souza. – 2017.

55f.:il.

Orientador: Francisco de Assis Dourado.

Coorientador: Miguel Ângelo Mane.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Prospecção – Métodos geofísicos – Teses. 2. Gravidade (Física) – Medição – Teses. 3. Geofísica – Parnaíba, Rio, Bacia (PI e MA) – Teses. 4. Bacias sedimentares – Parnaíba, Rio, Bacia (PI e MA) – Teses. I. Dourado, Francisco de Assis. II. Mane, Miguel Ângelo. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 550.83(812.1/2)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Márcio Cisnaldo de Souza

**Modelagem bidimensional e interpretação geológico-estrutural com base em dados aerogravimétricos e aeromagnetométricos de uma área a sudeste da Bacia do Parnaíba**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais

Aprovada em 27 de janeiro de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Francisco de Assis Dourado (Orientador)

Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. Miguel Ângelo Mane (Coorientador)

Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. Paulo de Tarso L. Menezes

Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof<sup>o</sup> Dr. Euzébio José Gil

Universidade Federal Rural do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2017

## **AGRADECIMENTOS**

Ao corpo docente do PPGABFM da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, por apresentarem empenho e dedicação ao ministrarem as aulas e nas orientações acadêmicas.

À ANP - Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis por ter cedido os dados para auxílio na realização deste projeto.

Ao coordenador do curso, pela atenção dispensada e interesse na solução das diversas situações acadêmicas.

Ao orientador e coorientador, pela atenção dispensada e interesse na solução das diversas situações acadêmicas.

A minha amada esposa, pela atenção, incentivo e apoio no desenvolvimento do projeto.

## RESUMO

SOUZA, Márcio Cisnaldo de. **Modelagem bidimensional e interpretação geológico-estrutural com base em dados aerogravimétricos e aeromagnetométricos de uma área a sudeste da Bacia do Parnaíba**. 2017. 53f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Levantamentos geofísicos aerotransportados são largamente aplicados na prospecção geológica de reservatórios de hidrocarbonetos. A eficiência, rapidez e custos baixos destes métodos na cobertura de grandes áreas, os credenciam como ferramenta importante para qualquer projeto de prospecção em bacias sedimentares, como é o caso da Bacia do Parnaíba. Dentre os métodos geofísicos aéreos, os métodos potenciais: gravimetria e magnetometria são os de maior disseminação em projetos de O&G (Óleo e Gás) para novas fronteiras. Tais métodos são usados como suporte ao conhecimento geológico em abordagens regionais e de detalhe, de forma integrada com dados sísmicos, geoquímicos e de poço. Em relação à gravimetria aérea, a aplicação inicial para levantamentos de carácter regional, e, para uso em levantamentos de detalhes, só tornou-se disponível ao mercado brasileiro a partir do ano de 2006. Com novas tecnologias disponibilizadas no mercado, os sistemas gravimétricos alcançaram melhor estabilização das suas plataformas inerciais instalados em aviões. Este trabalho pretende descrever este sistema de Gravimetria, bem como avaliar os resultados de sua aplicação na área de estudo na porção leste da Bacia do Parnaíba através de uma interpretação geológico-geofísica qualitativa executada com a geração de mapas tectono-estruturais e lineamentos magnéticos. O escopo deste trabalho levou a uma interpretação qualitativa dos lineamentos magnéticos e dos altos e baixos estruturais gravimétricos, sugerindo, assim, um mapa do contexto estrutural integrado da geologia e métodos geofísicos da área em estudo.

Palavras-chave: Métodos Geofísicos. Gravimetria. Magnetometria. Prospecção. Bacia do Parnaíba.

## ABSTRACT

SOUZA, Márcio Cisnaldo de. **Bi-dimensional modeling and geological and structural interpretation based on airborne gravity and magnetic survey at southeast Parnaíba Basin.** 2017. 53f. *Dissertation (Master in Geology)* – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Airborne geophysical surveys are widely used in geological prospecting of hydrocarbon reservoirs. The efficiency and acquisition speed of these methods in covering large areas, accredit then as a key tool for any project of prospecting located in frontier basins, such as Parnaíba Basin, where there is a quantity amount technical data. Among the airborne geophysical methods, potential methods, namely, gravity and magnetics are the most spread in O & G (Oil and Gas) projects of this nature. Such methods are used to support the generation of regional geological knowledge and also in detailed approaches, integrated with seismic, geochemical and well data. Specifically in the case of magnetometry, its use in more detailed specifications are available in the Brazilian market since the year 1988 with the release of the GPS signal to the market and mainly after the replacement of the proton precession magnetometers, by the cesium vapor (1991-1994), these one, much more accurate in determining the anomalous magnetic field. In terms of Airborne Gravity, applications in detailed approach was not available to the Brazilian market until the year 2006, surveys. This adaptation, brang some operational limitations to the system, since the initial conception was not thought for aerial surveys purposes. Even considering theses limitations, the data showed very good resolution for conventional gravity, and evaluate the results of its application in the study area portion east of the Parnaíba Basin through a geological-geophysical qualitative interpretation performed by generating tectono-structural maps and also magnetic lineaments. The scope of this work led to a qualitative interpretation of magnetic lineaments and high gravimetric and structural lows, suggesting a map of the integrated structural context of geological and geophysical methods of the study area.

Keywords: Geophysical Methods. Gravity. Magnetometry. Prospection. Parnaíba Basin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo na Bacia do Parnaíba.....	11
Figura 2 – Mapa com as linhas de voos na direção leste-oeste espçadas de 6 km.....	12
Quadro – Coordenadas geográficas dos vértices da área.....	12
Figura 3 – Localização da área no aerolevante regional na Bacia do Parnaíba.....	13
Figura 4 – Disposição de Províncias do Cráton Amazônico.....	14
Figura 5 – Representação das falhas, diques e alinhamentos morfológicos que definem os lineamentos transbrasiliano e Picos-Santa Inês.....	16
Figura 6 – Carta estratigráfica, Bacia do Parnaíba .....	18
Figura 7 – Principais lineamentos regionais das Províncias do Parnaíba e Borborema.....	20
Figura 8 – <i>Riftes</i> da Bacia do Parnaíba, com predominância NNW e NE.....	21
Figura 9 – Modelo digital do terreno do SRTM.(NASA, GEOSOFT).....	22
Figura 10 – Fluxograma de processamento de dados – GRAVITON .....	23
Figura 11 – Mapa residual da anomalia BOUGUER .....	24
Figura 12 – Fluxograma de processamento de dados magnéticos .....	26
Figura 13 – Mapa da Intensidade Magnética Total (Reduzido do IGRF) .....	29
Figura 14 - Mapa da Intensidade Magnética Reduzido ao Pólo .....	32
Figura 15 – Mapa do Sinal Analítico – RTP .....	33
Figura 16 – Mapa Residual da Anomalia BOUGUER .....	34
Figura 17 – Mapa da primeira derivada vertical do TMI .....	35
Figura 18 – Gráficos com modelo e resposta de frequência .....	37
Figura 19 – Mapa do TMI-RTP com algumas feições interpretadas .....	42
Figura 20 - Mapa do sinal analítico .....	43
Figura 21 – Mapa da Primeira Derivada Vertical do TMI interpretado .....	44
Figura 22 – Mapa da anomalia BOUGUER interpretado .....	45
Figura 23 – Mapa geológico integrado com as feições magnéticas e gravimétricas .....	46
Figura 24 – Mapa integrado das feições geológicas, magnéticas e gravimétricas .....	47
Figura 25 – Mapa da Anomalia BOUGUER com a localização dos perfis.....	48
Figura 26 – Mapa do TMI com com a localização dos perfis .....	49
Figura 27 – Modelagem 2D Perfil A_B .....	50
Figura 28 – Modelagem 2D Perfil C_D .....	51
Figura 29 – Modelagem 2D Perfil E_F .....	51



## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	08
1	<b>LOCALIZAÇÃO</b> .....	10
1.1	<b>Localização da Bacia do Parnaíba</b> .....	10
2	<b>GOLOGIA REGIONAL</b> .....	14
2.1	<b>Embasamento</b> .....	15
2.2	<b>Geologia da Bacia do Parnaíba</b> .....	16
2.2.1	<u>Arcabouço Estrutural Simplificado</u> .....	19
2.2.2	<u>Sistema de Riftes da Bacia do Parnaíba</u> .....	20
3	<b>PROCESSAMENTO</b> .....	22
3.1	<b>Processamento de Dados Gravimétricos</b> .....	23
3.1.1	<u>Nivelamento das Linhas de Controle</u> .....	23
3.1.2	<u>Processamento Adicional</u> .....	24
3.1.3	<u>Interpolação</u> .....	24
3.2	<b>Processamento de Dados Magnetométricos</b> .....	25
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	30
4.1	<b>Metodologia da Interpretação Qualitativa</b> .....	30
4.1.1.	<u>Dados Magnetométricos Básicos</u> .....	30
4.1.2	<u>Dados Gravimétricos Básicos</u> .....	34
4.2	<b>Realces Aplicados aos dados Gravimétricos e Magnetométricos</b> .....	35
5	<b>INTERPRETAÇÃO</b> .....	38
5.1	<b>Critérios de Risco na Interpretação dos dados Gravimétricos</b> .....	38
5.2	<b>Critérios de Risco na Interpretação dos dados Magnetométricos</b> .....	39
6	<b>RESULTADOS</b> .....	41
6.1	<b>Resultados e Discussões</b> .....	41
6.1.1	<u>Mapas e Interpretações – Magnetometria</u> .....	41
6.1.2	<u>Mapas e Interpretações – Gravimetria (BREVILLEGE, G. L. et alii. 1977)</u> .....	44
6.2	<b>Modelagem Gravimétrica e Magnetométrica</b> .....	47
	<b>CONCLUSÕES</b> .....	52
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53

## INTRODUÇÃO

Métodos Potenciais, quais sejam, Gravimetria e Magnetometria são ferramentas reconhecidas na prospecção de áreas com potencial estrutural para reservatórios de hidrocarbonetos, sendo seu uso tradicional na indústria de O&G (Oil & Gas), principalmente na fase de exploração de bacias sedimentares.

Tais métodos geofísicos são tradicionalmente utilizados na investigação de bacias de nova fronteira, onde há pouquíssimos dados técnicos disponíveis, objetiva reduzir rapidamente a área de investigação à área de maior probabilidade de acumulação, ou seja, cobre-se uma bacia inteira através de levantamentos aerotransportados ou transportados por navios, para, a partir da interpretação geológica dos dados de magnetometria e gravimetria, definir áreas onde se concentrarão os investimentos em ferramentas de exploração de custo mais elevado, tais como sísmica e sondagem (poços), alocando-os com maior eficiência.

Por outro lado, a aplicação de tais métodos não se restringe apenas ao cenário descrito acima. Pode-se dizer que, durante toda fase de exploração, medidas de campo gravimétrico e magnético da terra têm apresentado excelentes resultados no suporte à geração de conhecimento geológico das áreas de pesquisa, podendo-se citar: Interpretação Geológica Integrada de Prospectos, Análise de Risco Geológico de Poço, Orientação Tridimensional de Poços Direcionais, entre outras. Diante deste quadro é possível afirmar que métodos potenciais podem ser utilizados desde a fase inicial de exploração, até fase de definição de reservas de hidrocarbonetos.

Por suas características, a magnetometria, aérea de alta resolução adequada aos objetivos exploratórios da indústria de O&G, teve início no ano de 1994, enquanto que a gravimetria aérea continuava limitada à medida do componente vertical do campo, muito influenciada pelas inevitáveis turbulências da aeronave durante as operações de aquisição de dados, e, portanto, com confiabilidade limitada às frequências que representam as respostas de feições geológicas mais regionais. A gravimetria foi o primeiro método geofísico utilizado para descobrir um campo de petróleo e o primeiro a ser amplamente utilizado na prospecção de hidrocarbonetos.

Necessário se faz apontar os objetivos gerais e específicos deste projeto, além da justificativa e dos dados utilizados para uma correta compreensão de seu alcance.

- a) Objetivo Gerais - Utilizar os métodos potenciais na seleção de alvos estruturais para hidrocarbonetos, denominados Gravimetria e

Magnetometria, que, numa abordagem bem resumida, consiste em medir a componente do campo gravimétrico e a susceptibilidade magnética e os dados de poços realizados dentro da área de estudo;

- b) Objetivos Específicos - Com o reprocessamento e gridagem dos dados aeromagnéticos e aerogravimétricos da área em estudo gerar mapas geofísicos e do arcabouço geológico-estrutural com alvos para prospecção de hidrocarboneto como também mensurar a profundidade do embasamento magnético, através da interpretação qualitativa dos dados e de uma modelagem direta 2D;
- c) Justificativa - A Bacia do Parnaíba, caracterizada como novas fronteiras, carece de mais estudo e o escopo deste trabalho contribui para um melhor entendimento estrutural da área em estudo;
- d) Dados Utilizados - Banco de dados aéreos da gravimetria e magnetometria extraídos do aerolevanteamento regional 0050\_GRAVMAG002 em 2002, dados de poços fornecidos pela ANP/BDEP: 1MD0001\_MA, 1BGS0001\_MA, 1FL0001\_PI e mapa geológico da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM).

## 1 LOCALIZAÇÃO

No presente capítulo é descrita a localização da área do levantamento em relação ao mapa do Brasil, dos estados do Maranhão e Piauí e os limites da Bacia do Parnaíba. Adicionalmente indica uma lista de coordenadas dos vértices que compõem o polígono da área em estudo, denominada área a sudeste da Bacia do Parnaíba.

### 1.1 Localização da Bacia do Parnaíba

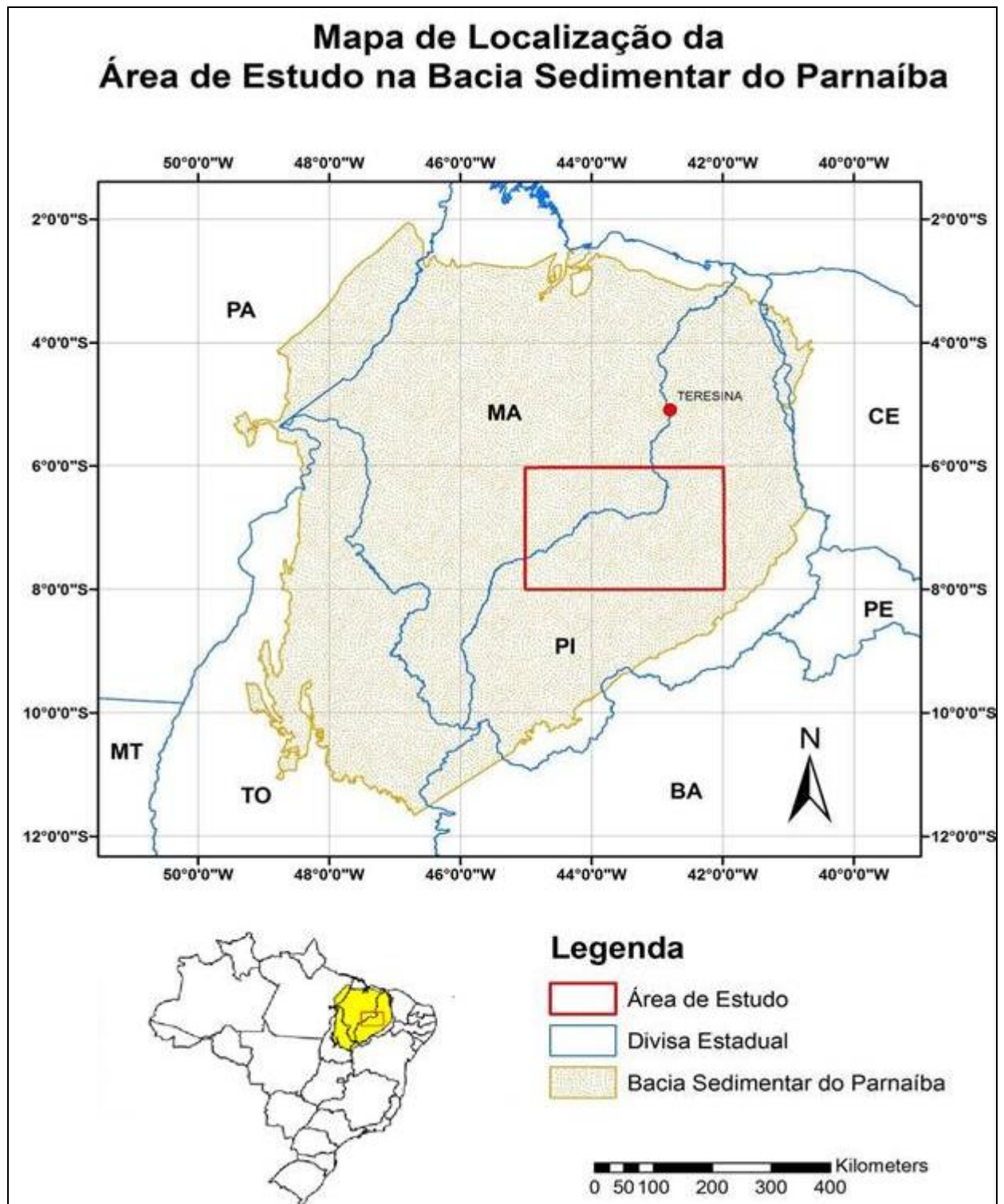
A área em estudo, que é escopo do presente trabalho, localiza-se na porção sudeste do Estado do Maranhão e sudoeste do Estado do Piauí (Figura 1), recobrimdo uma área de aproximadamente 73.700 km<sup>2</sup> abrangendo uma área entre os municípios de Balsas-MA, Floriano-PI e Canto do Buriti-PI.

O Quadro apresenta as coordenadas dos vértices da área (Datum WGS-84). O levantamento recobriu aproximadamente 12.533,57 km de perfis lineares gravimétricos e magnetométricos.

A aeronave responsável pelo recobrimento da área foi o Caravan C208, com linhas de voo e de controle espaçadas de 6.000 metros na direção leste-oeste e 24.000 metros na direção norte-sul, respectivamente.

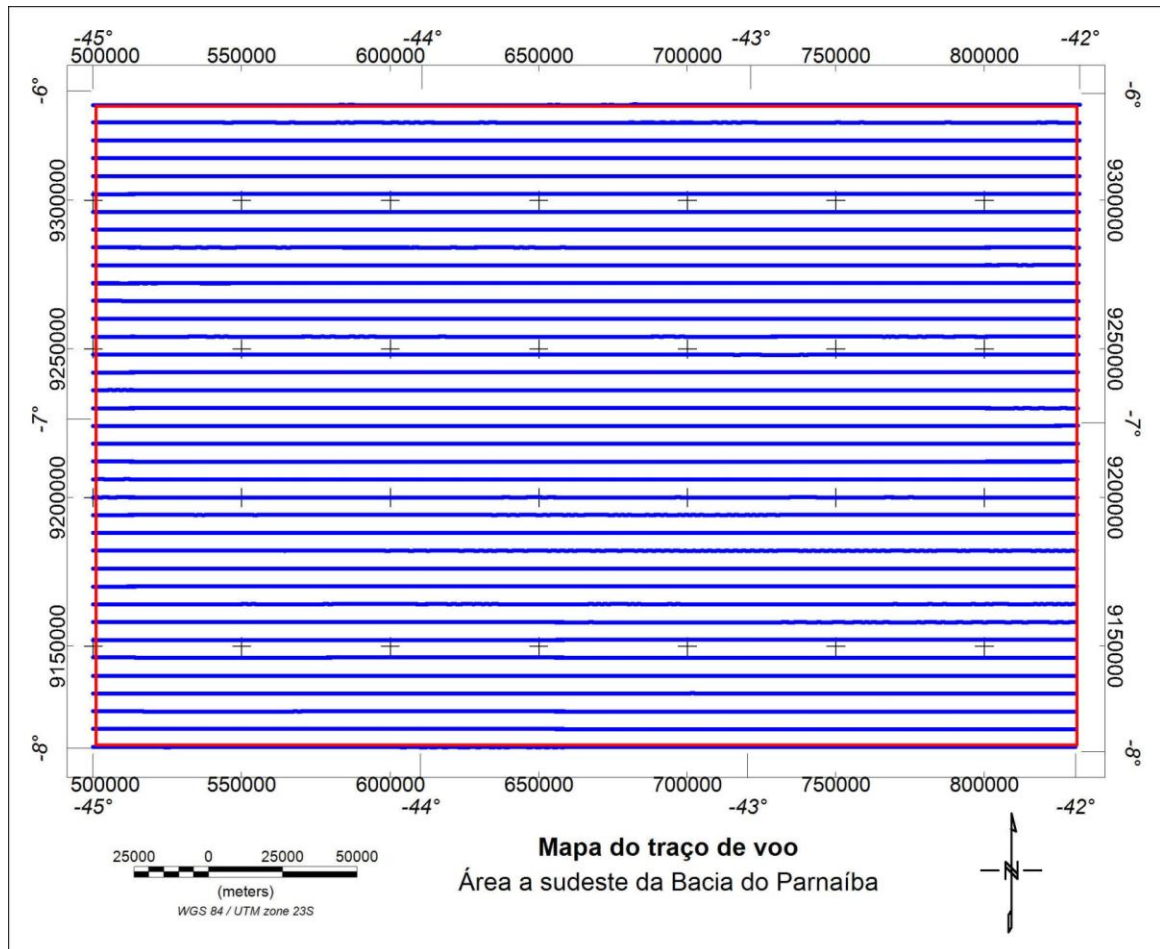
A altitude de voo fixada foi de 500 a 800 metros acima do ponto mais elevado do terreno em regime horizontal. A Figura 2 mostra as linhas de voos.

Figura 1– Localização da área de estudo, Bacia do Parnaíba.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 2 – Mapa com as linhas de voo na direção leste-oeste, espaçadas de 6 km.



Fonte: O autor, 2017.

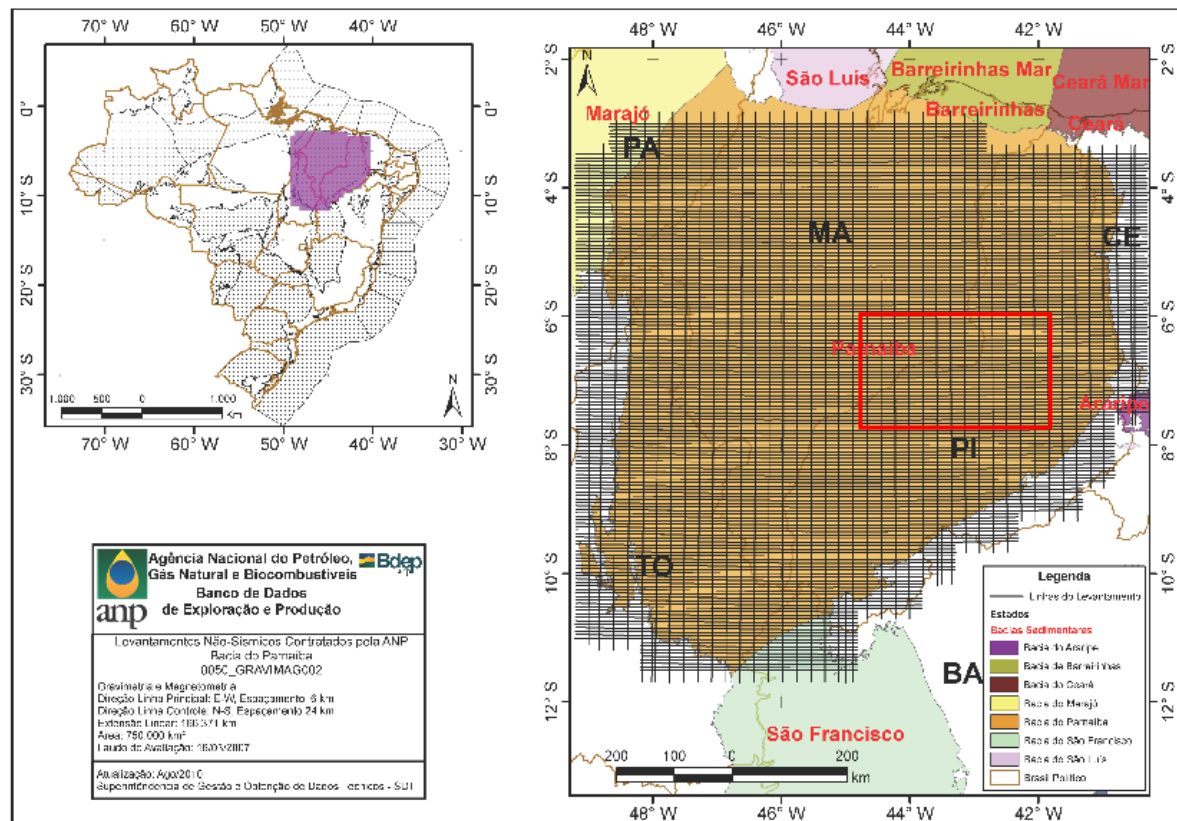
**Quadro** – Coordenadas geográficas dos vértices da área (WGS 84).

Vértice	Latitude	Longitude
1	-45:00:00	-06:00:00
2	-42:00:00	-06:00:00
3	-42:00:00	-08:00:00
4	-45:00:00	-08:00:00

Fonte: O autor, 2017.

A Bacia do Parnaíba foi coberta pelo aerolevanteamento geofísico por magnetometria e gravimetria em escala regional com o intuito de selecionar áreas no contexto estrutural para a prospecção de hidrocarbonetos apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Localização da área no aerolevantamento regional na Bacia do Parnaíba - realizado em 12 de fevereiro de 2005 a 23 de agosto de 2006.



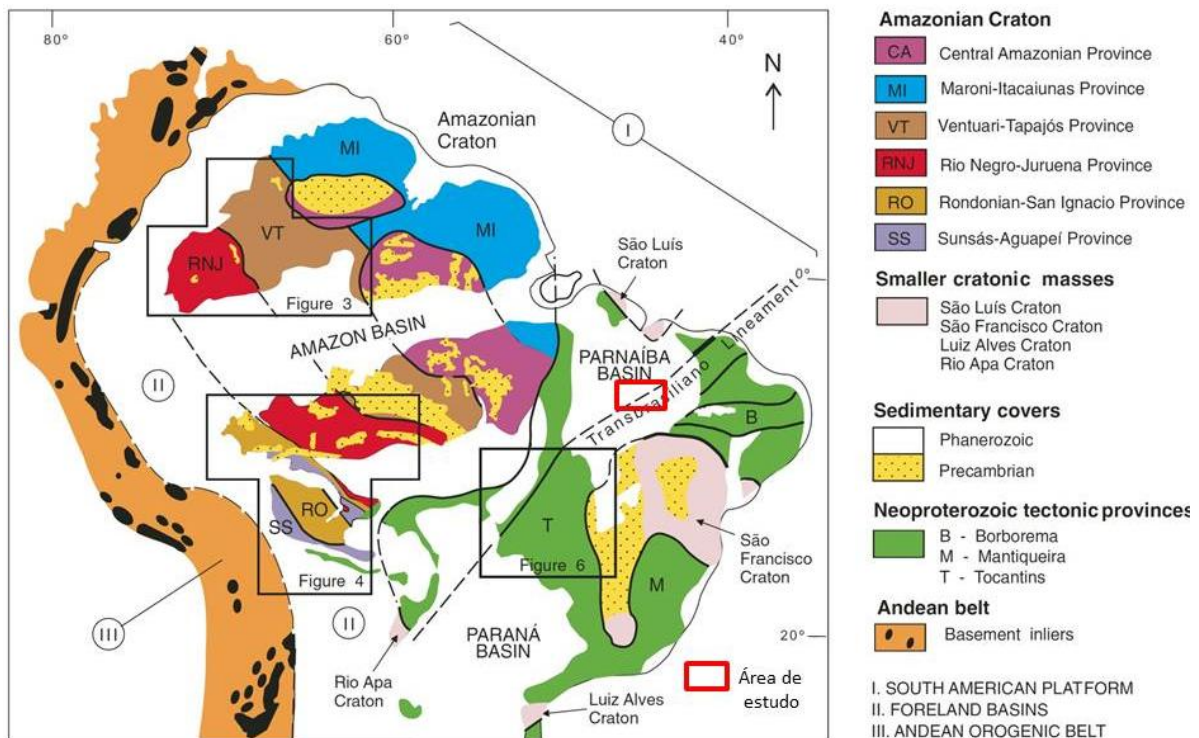
Fonte: ANP. Disponível em: <[www.bdep.gov.br](http://www.bdep.gov.br)> . Acesso em : 10 de junho de 2016.

## 2 GEOLOGIA REGIONAL

Neste capítulo será apresentado um resumo da geologia da Bacia do Parnaíba, com a descrição das principais feições geológicas. Procurar-se-á destacar as feições que segundo a descrição geológica tem maior probabilidade de mapeamento através de métodos potenciais.

Com a abertura do supercontinente Colúmbia e aglutinação do Rondínia do Arqueano ao Mesoproterozóico (Figura 4), a Bacia desenvolveu-se sobre um substrato de rochas não mais antigas que o Mesoproterozóico, das quais matassedimentos de grau baixo a intermediário de metamorfismo se expõem nas faixas de dobramento que a circundam, limitando os crátons do Amazonas, São Luís e São Francisco, além de rochas magmáticas relacionadas ao Ciclo Brasileiro

Figura 4 - Disposição de Províncias no Cráton Amazônico.



Fonte: Proposto por CORDANI; TEIXEIRA, 2007.



## 2.1 Embasamento

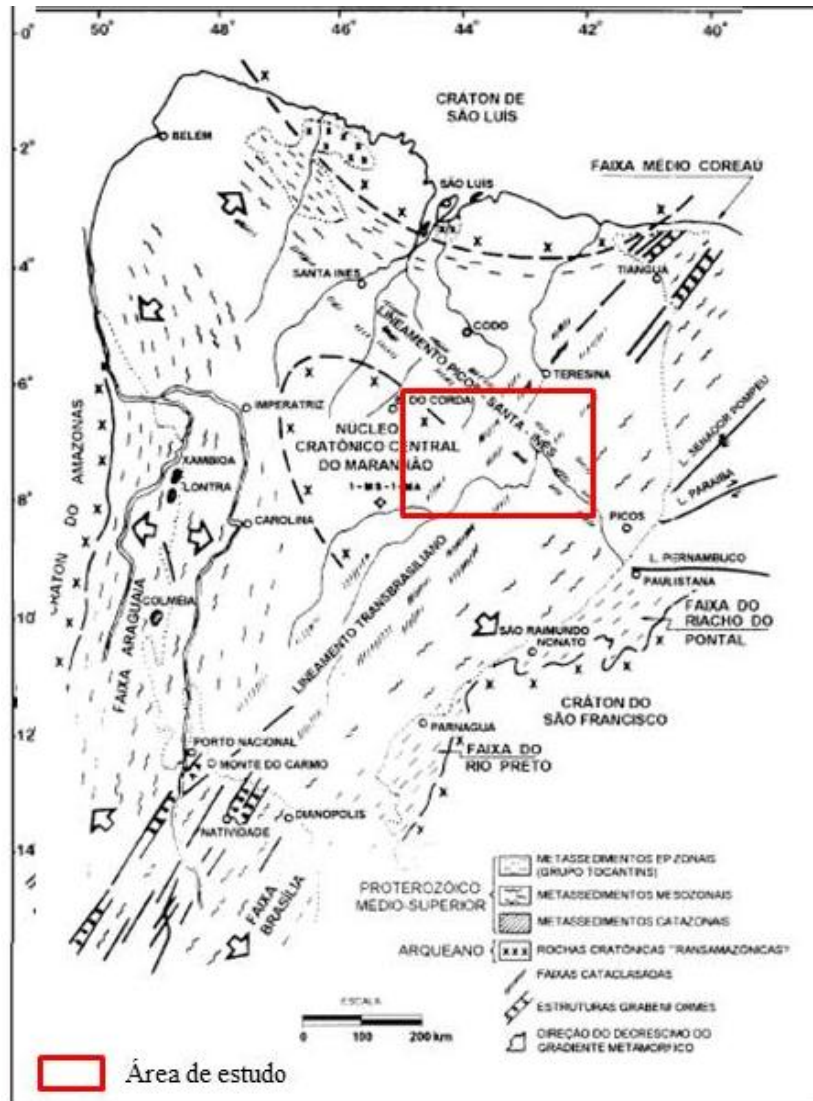
O embasamento da região se apresenta fortemente estruturado, formado no ciclo Brasileiro. A consolidação da plataforma Sul-americana foi completada entre o final do Proterozóico e início do Fanerozóico (700-450 Ma), CORDANI et al., 1984.

CUNHA (1986) relaciona duas importantes estruturas do embasamento da bacia do Parnaíba: o Lineamento Transbrasiliano e o Lineamento Picos-Santa Inês. O Lineamento Transbrasiliano representa uma feição alongada de cerca de 9.700 km, com orientação NE-SW, que cruza o território brasileiro do Ceará ao Mato Grosso e prossegue para sudoeste, penetrando no Paraguai e Argentina (SCHOBENHAUS et al., 1975). Este lineamento é demarcado na bacia por falhas orientadas na direção NE-SW, que cortam rochas paleozóicas e mesozóicas, e por diques de diabásicos orientados no mesmo sentido. O lineamento Transbrasiliano teria mantido ativo desde a sua instalação até a época presente (CUNHA, 1986). O lineamento Picos-Santa Inês constitui uma faixa cataclástica com orientação NW-SE. Esta faixa reflete a morfologia atual produzindo alinhamentos orientados na direção NW. Este lineamento exerceu uma grande influência no desenvolvimento da bacia do Parnaíba, controlando importantes eixos deposicionais (CUNHA, 1986). A presença de estruturas grabeniformes do embasamento da Bacia do Parnaíba, obtidas a partir da modelagem de dados gravimétricos e aeromagnéticos (GÓES & TRAVASSOS, 1992).

Em mapas magnéticos o Lineamento Transbrasiliano (L.T.) mostra-se de forma como uma destacada estruturada de escala continental, tanto em aerolevantamentos como uma zona de anomalias de baixa frequência, quanto por dados de satélite (FAIRHEAD & MAUS 2003).

Conforme mencionado por SADOWSKI & CAMPANHA (2004), o lineamento também apresenta uma evidente assinatura gravimétrica, visível no mapa de anomalia Bouguer.

Figura 5- Representação das falhas, diques e alinhamentos morfológicos que definem os lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês.



Fonte: CUNHA, 1986.

## 2.2 Geologia da Bacia do Parnaíba

A área da Província Parnaíba (600.000 km<sup>2</sup>) é coincidente com a província sedimentar do Meio-Norte. Esta designação foi proposta por GÓES (1995), que comprovou a dificuldade de compreensão do quadro tectono-sedimentar, no contexto de uma bacia única. A designação é pertinente, uma vez que sua evolução deu-se de maneira policíclica compartimentada em bacias com gêneses, estilos tectônicos, preenchimento sedimentar e idades distintas.

A Bacia do Parnaíba é considerada classicamente como uma bacia intracratônica (MESNER & WOOLDRIDGE, 1964, AGUIAR 1971), cuja origem iniciou-se como fratura interior continental, durante o cambro-ordoviciano, passando a sinéclise interior continental, a partir do siluriano (FIGUEIREDO & RAJA GABAGLIA, 1986).

A extensão de sedimentos da Bacia do Parnaíba é remanescente de uma área originalmente maior. Indícios de sedimentos paleozóicos com características estratigráficas e sedimentológicas semelhantes sugerem conexões com a Bacia do Amazonas e as bacias de áreas extracontinentais como as situadas em Gana, na África. Além disso, corrobora esta idéia, a presença de sedimentos paleozóicos correlatos no embasamento de diversas bacias interiores situadas na Província do Borborema (p.e bacias do Araripe, Rio do Peixe). O seu preenchimento sedimentar é constituído por depósitos gerados em 4 ciclos deposicionais (Figura 6).

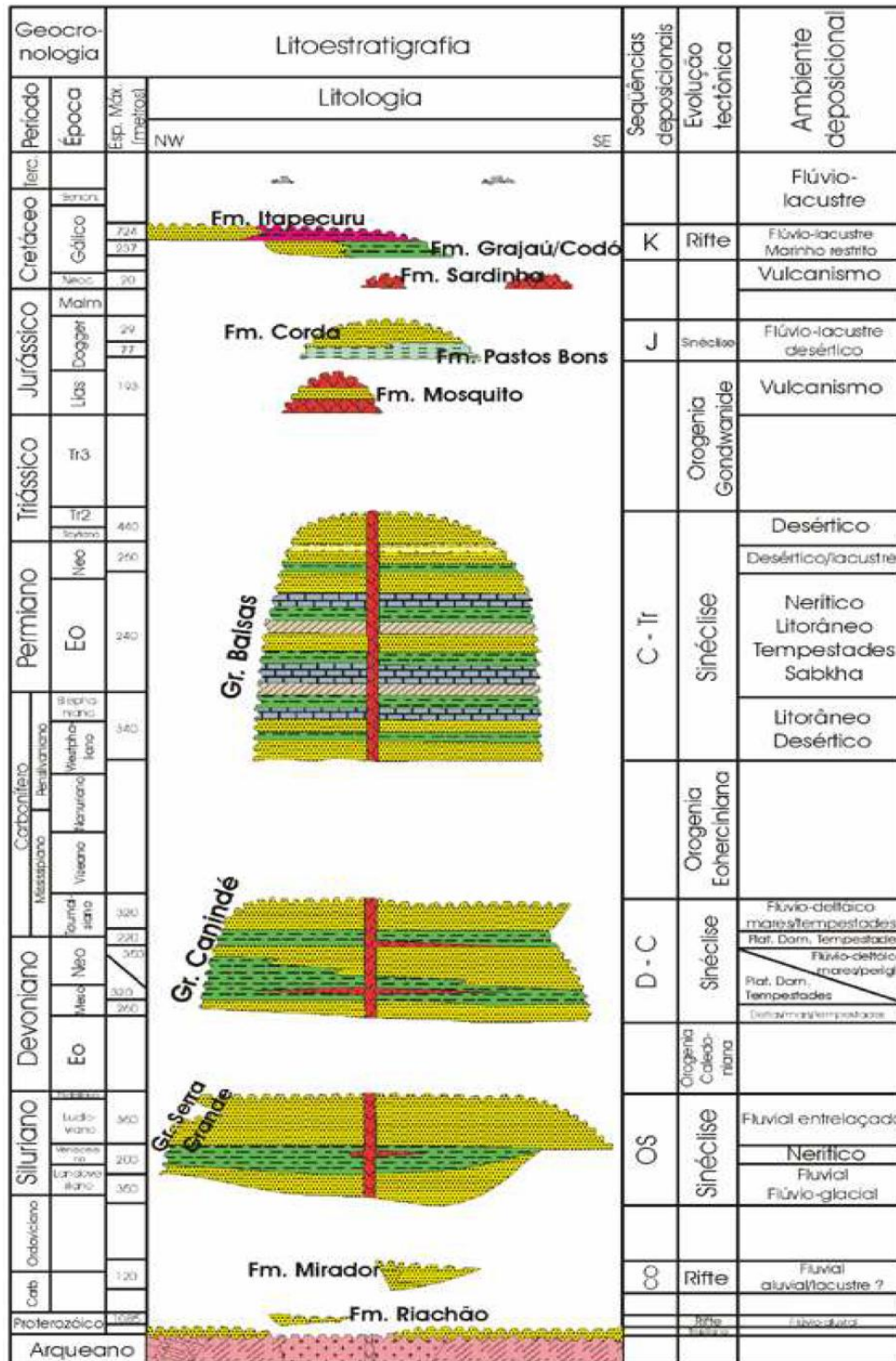
O primeiro formado pelo Grupo Serra Grande (Siluriano), inicia-se com os conglomerados e os arenitos flúvio-glaciais da Formação Ipu, seguidos de arenitos e folhelhos marinhos da Formação Tianguá e arenitos e conglomerados fluviais da Formação Jaicós.

O segundo ciclo corresponde ao Grupo Canindé, formado pelos arenitos e folhelhos marinhos das formações Itaim e Pimenteiras, seguidas de diamictitos e os arenitos glacio-marinhos da Formação Cabeças, dos folhelhos marinhos da Formação Longá e dos arenitos regressivos da Formação Poti.

O terceiro ciclo, Grupo Balsas, inicia-se com sedimentação siliciclástica flúvio-eólica, com breves incursões marinhas representadas pelos arenitos, calcários e anidritas da Formação Piauí; seguidas por arenitos, folhelhos e calcários de planícies de maré da Formação Pedra de Fogo. Este ciclo finaliza com folhelhos e anidritas lacustres da Formação Motuca e arenitos eólicos da Formação Sambaíba representando o máximo de desertificação. A Bacia do Parnaíba encerra sua evolução com o ciclo representado pelo Grupo Mearim. Este é formado pelos depósitos flúvio-lacustres das formações Corda e Pastos Bons, cuja idade corresponde ao intervalo Jurássico Médio-Cretáceo Inferior.

Rochas básicas efusivas juro-triássicas da Formação Mosquito, ocorrem na porção ocidental da Bacia, enquanto que rochas intrusivas eocretáceas da Formação Sardinha dominam a porção oriental (MESNER & WOOLDRIDGE, 1964, AGUIAR, 1971, CALDASSO & HAMA 1978).

Figura 6 – Carta estratigráfica, Bacia do Parnaíba.



Fonte: ANP, TOMO VI: Área do Parnaíba, Vol. I. Modificado do Boletim de Geociências da Petrobras n.1, vol. 8, 1994.

### 2.2.1. Arcabouço Estrutural Simplificado

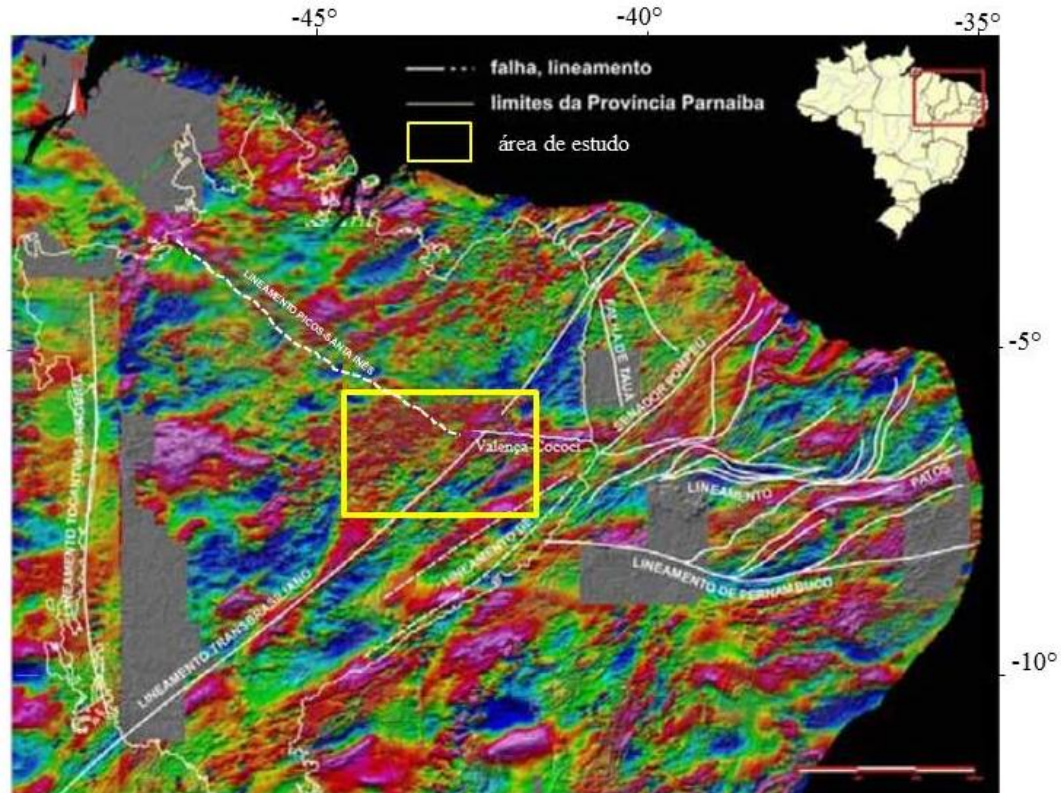
A Bacia do Parnaíba limita-se estruturalmente a norte pelo Arco Femer-Urbano Santos, a oeste e central o Arco Tocantis e a sudeste pelo Arco São Francisco e o perfil WSW-ESE, onde mostra as calhas estruturais e períodos da formações (Figura 8).

O arcabouço tectônico da Bacia do Parnaíba representa as feições geradas durante o Ciclo Brasileiro que foram fundamentais em toda sua evolução geológica da Bacia (CAROZZI *et al.* 1975; FORTES, 1978; CUNHA 1986, GÓES *et al.*, 1993 e CORDANI *et al.*, 1984).

Feições grabeniformes no embasamento foram interpretadas por GÓES *et al.*, 1993, a partir de métodos geofísicos, tais como: gravimetria, magnetometria, sísmica e dados geológicos de superfície e de poços. Algumas feições predominantes na orientação NW-SE, com idades neoproterozóicas e correlacionáveis às coberturas dos crátons Amazônico e São Francisco, dentre outras feições estruturais marcantes com idade cambro-ordovicianas com orientações NE-SW, correspondem à continuidade dos grabens Cococi, São Julia, São Raimundo Nonato e Correntes.

As estruturas da Bacia do Parnaíba marcante estão no Paleozóico, onde correspondem aos Lineamentos Transbrasiliano (NE-SW), Picos-Santa Inês (NW-SE) e Tocantis-araguaia (N-S). Durante o paleozoico até o carbonífero, os lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês comportam-se como eixos deposicionais. A partir do carbonífero superior, foram iniciados os movimentos precursores de agregação do supercontinente Pangea ligado à Orogenia Eoherciniana (GÓES & FEIJÓ, 1994), o que promoveu o deslocamento do depocentro para noroeste, o início da retração da área deposicional e do processo de continentalização da bacia.

Figura 7 – Principais lineamentos regionais das províncias do Parnaíba e Borborema. Imagem aeromagnética e modelo digital de relevo sombreado. Principais estruturas traçadas segundo SADOWSKI & CAMPANHA (2004), CUNHA (1986) e GÓES (1995).



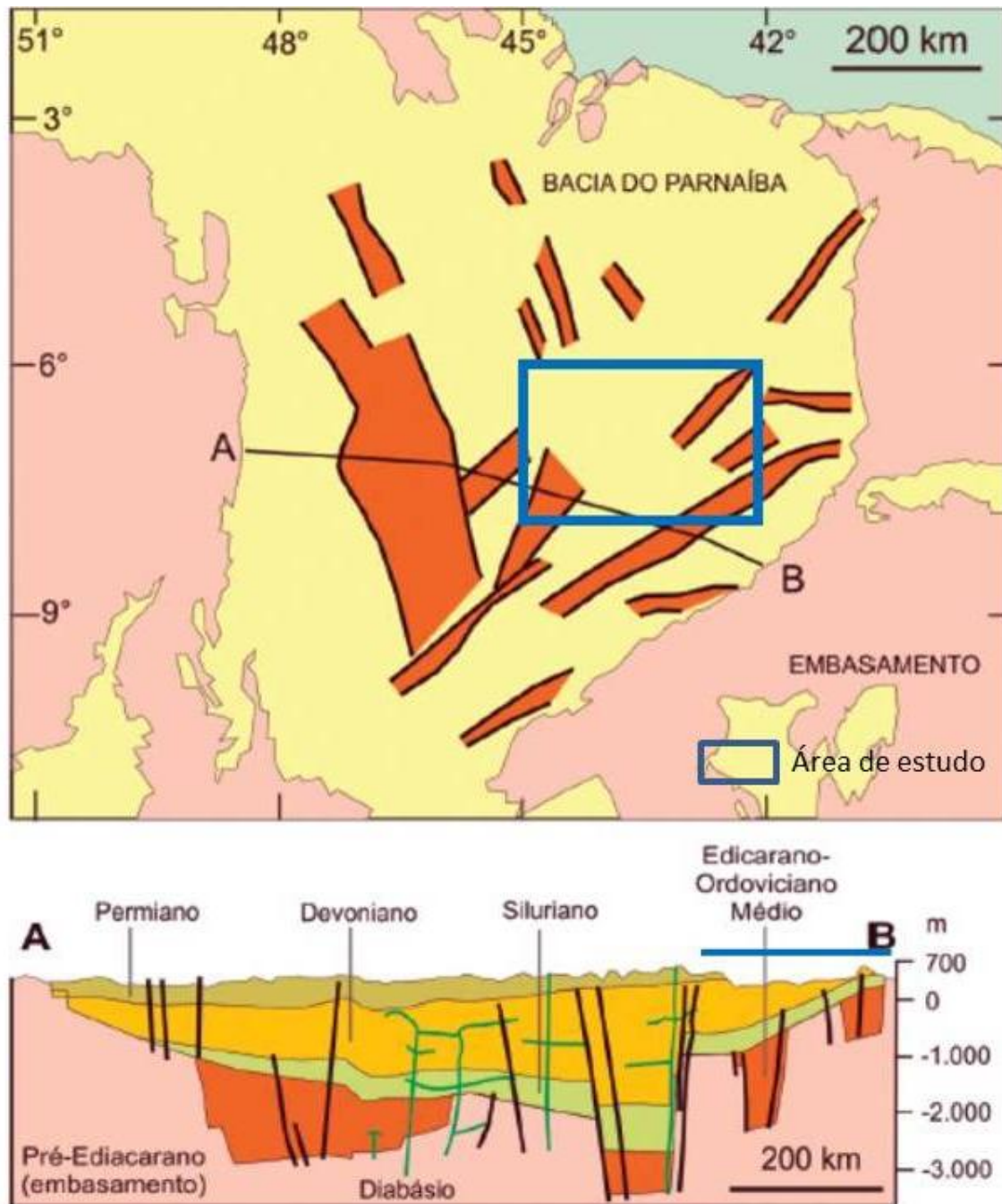
Fonte: Dissertação de mestrado, Chamani, Marlei Antonio USP IG 2011.

### 2.2.2. Sistema de Riftes da Bacia do Parnaíba

O sistema de riftes da Bacia do Parnaíba (Figura 8) apresenta uma direção NNW e NE concomitantes aos lineamentos Picos-Santa Inês e o Lineamento Transamazônico. (Simplif. De GÓES et al. 1983)



Figura 8 – *Riftes* da Bacia do Parnaíba com predominância da direção NNW e NE.



Fonte: Livro Geologia do Brasil (CPRM). Simplificado de GÓES et al. 1983.

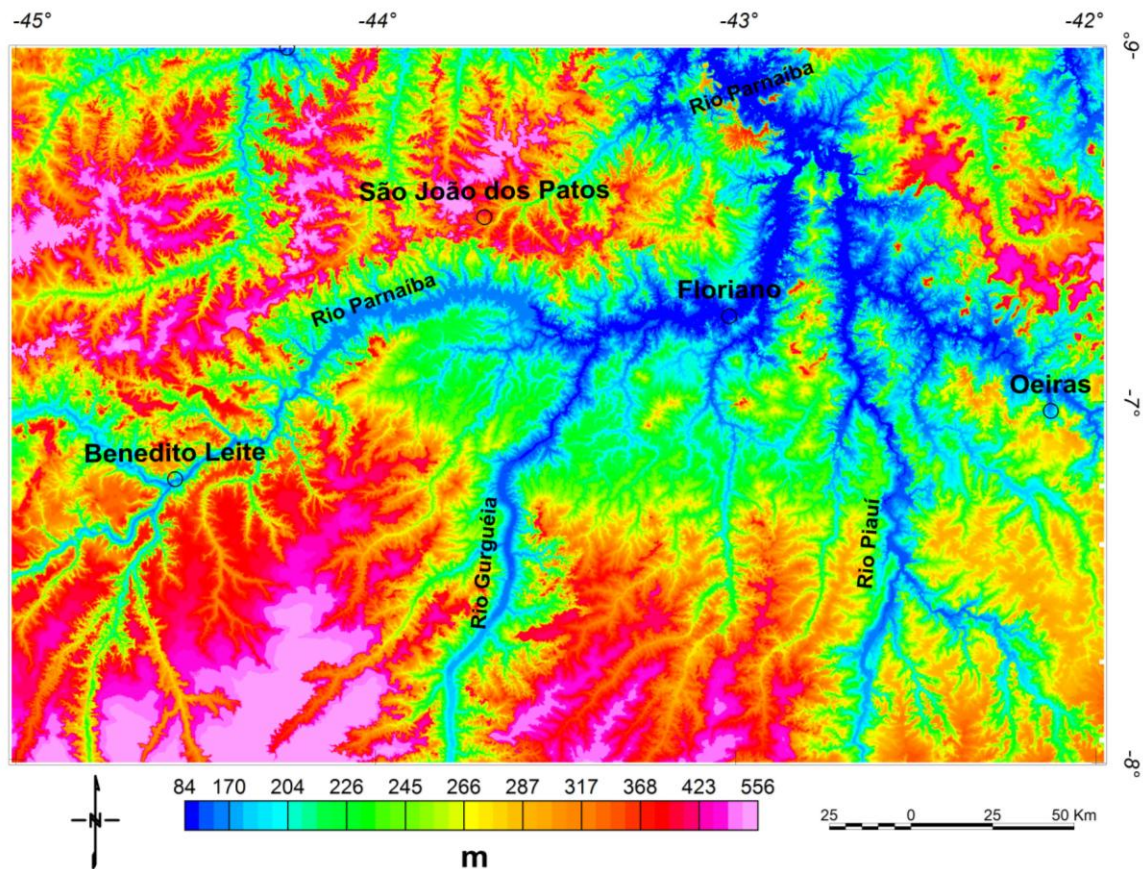
### 3 PROCESSAMENTO

Neste presente capítulo serão abordadas as questões relevantes ao planejamento da aquisição de dados de aéreos gravimétricos e magnetométricos, as características do sistema, bem como os principais passos do processamento dos dados de Gravimetria e Magnetometria.

Modelo Digital do Terreno (MDT) do *Shuttle Radar Topography Mission* com resolução de 90m - SRTM (90m) da área em estudo.

O MDT na Figura 09 da área de estudo apresenta uma tografia mediana com seu ponto mais alto aproximadamente 556 metros de altura em relação ao nível do mar e, não apresenta nenhuma feição estrutural na superfície e nem controle do padrão de drenagem.

Figura 9 - Modelo Digital do Terreno do SRTM (NASA, Geosof).



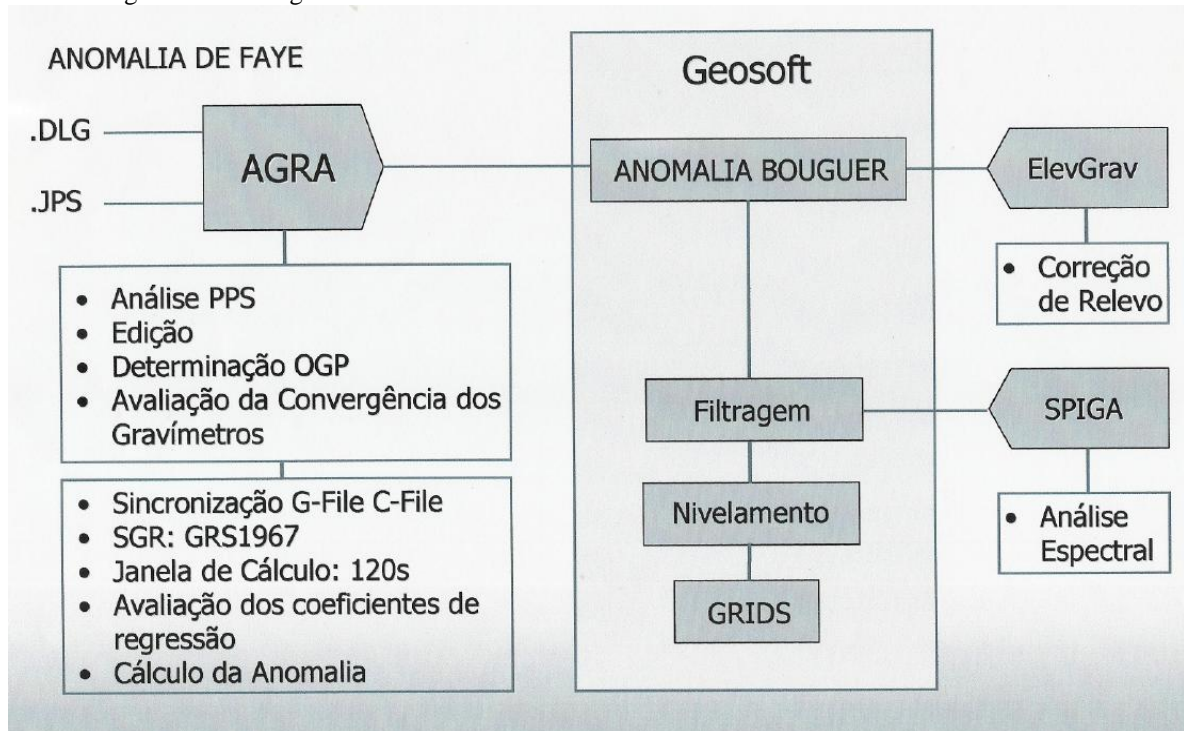
Fonte: O autor, 2017.



### 3.1 Processamento de Dados Gravimétricos

A seguir é apresentado um fluxograma na Figura 10, que segue abaixo, a qual resume os principais passos para processamento dos dados de gravimetria adquiridos pelo sistema Graviton.

Figura 10 - Fluxograma de Processamento de Dados – GRAVITON.



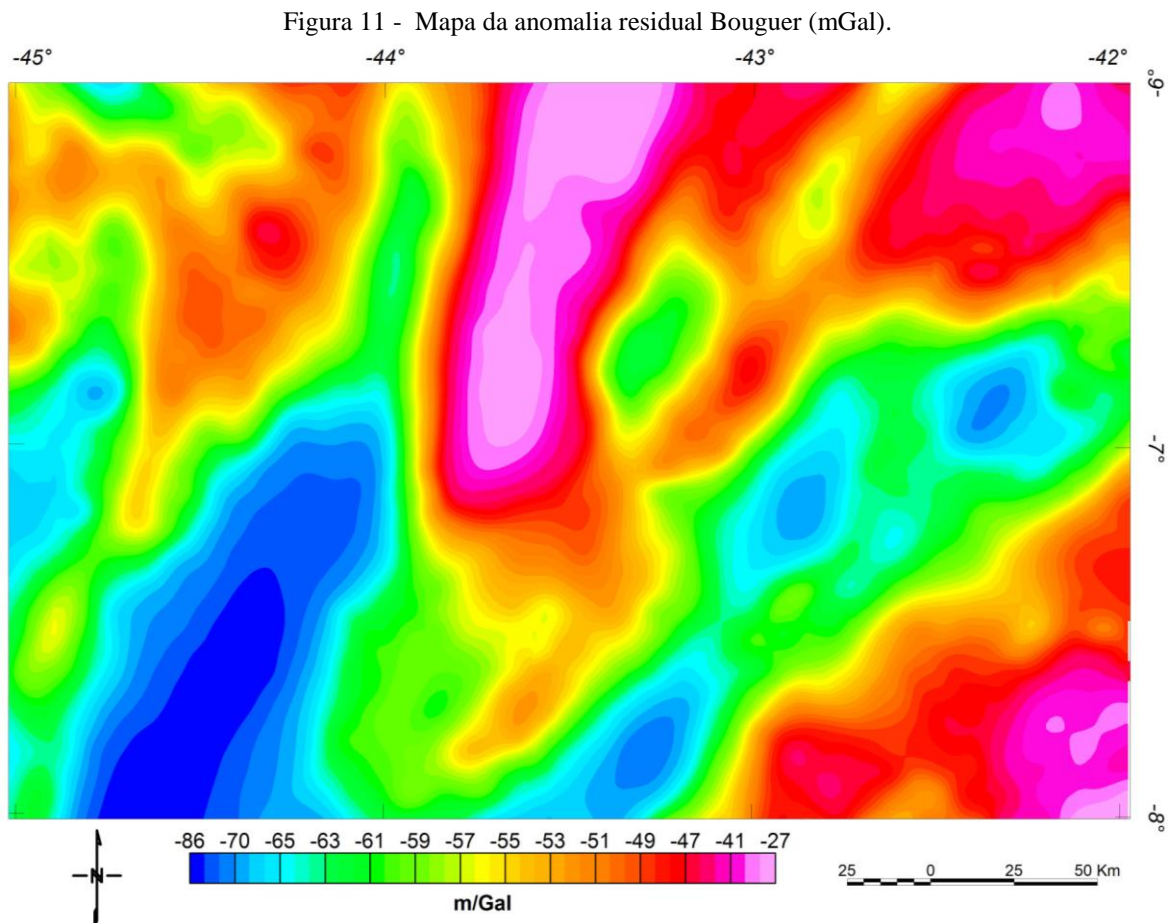
Fonte: O autor, 2017.

#### 3.1.1 Nivelamento das Linhas de Controle

Os dados corrigidos do terreno e os corrigidos pelo auto-gradiente são nivelados pelas linhas de controle em todo o levantamento usando a minimização dos mínimos quadrados das diferenças nas interseções das linhas do levantamento. Ocasionalmente algum micro nivelamento poderá ser executado.

### 3.1.2 Processamento Adicional

A gravidade vertical ( $g_D$ ) é gerada pelo método da transformada de Fourier. Este mapa é apresentado na Figura 11.



Fonte: O autor, 2017.

### 3.1.3 Interpolação

Para obtenção da malha quadrada dos valores da gravidade Bouguer foi utilizado o programa BIGRID, que interpola dados distribuídos em perfis, paralelos ou subparalelos, usando *Akima* para interpolar primeiramente as amostras distribuídas ao longo das linhas de voo e *Cubic* na direção perpendicular às mesmas.

Este processo leva em conta a maior taxa de amostragem na direção das linhas de voo e a extensão lateral das feições mapeadas, observando-se forte correlação entre perfis laterais. Os grids foram elaborados a partir de interpolação em malha quadrada, com as dimensões de 1500m x 1500m.

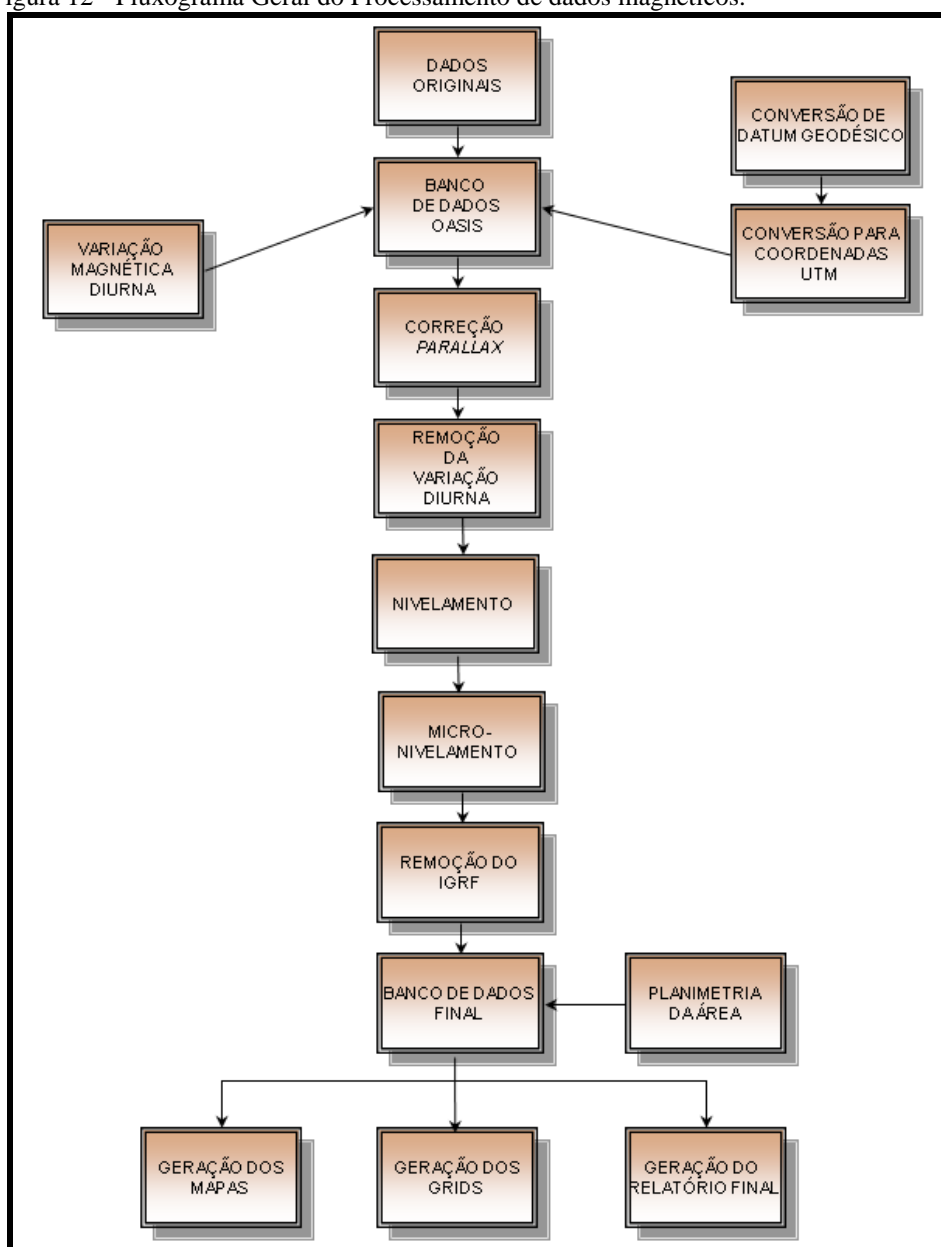
## 3.2 **Processamento de Dados Magnetométricos**

### 3.2.1 Fluxograma de Processamento

Para processamento dos dados de magnetometria foi utilizado o sistema Oasis Montaj da *Geosoft*.

Na Figura 12 é apresentado o fluxograma de processamento, onde estão indicadas as diferentes etapas envolvidas no processo, desde a transferência dos dados da aeronave contendo as gravações originais de voo até a preparação dos produtos finais.

Figura 12 - Fluxograma Geral do Processamento de dados magnéticos.



Fonte: O autor, 2017.

As diferentes fases envolvidas no processamento estão detalhadas nos itens que se seguem:

### 3.2.1.1 Remoção da Variação Magnética Diurna

Os valores obtidos pelo magnetômetro monitor foram inicialmente subtraídos do nível base de 24.970 nT para as observações realizadas. As diferenças encontradas, positivas ou negativas, foram, então, somadas algebricamente às leituras do campo magnético realizadas a

bordo da aeronave, tendo como variável comum a hora de amostragem, fixada com precisão de décimos de segundo. Os valores resultantes correspondem à intensidade total do campo magnético corrigido da variação diurna.

### 3.2.1.2 Nivelamento dos Perfis

A aplicação do nivelamento pelo sistema *Oasis Montaj*, consiste, basicamente, no ajuste das linhas de controle com base na média das diferenças (ou diferença de 1ª ordem) com as linhas de medida. Este procedimento assume que tais diferenças estão distribuídas de forma aleatória, de forma que um *trend* de no máximo 1ª ordem define o desnível entre as linhas de medida e controle.

O procedimento compreende duas etapas distintas conforme a seguir:

- a) As linhas de controle são niveladas por aplicação de valores que reduzam as diferenças com as linhas de voo a valores mínimos. Este procedimento assume que existem cruzamentos suficientes para modelar adequadamente as diferenças de nível entre as linhas de controle;
- b) Após o nivelamento das linhas de controle, todas as linhas de medida são ajustadas às linhas de controle, de forma que os valores do campo magnético encontrados nos seus cruzamentos sejam equivalentes.

O software *Oasis Montaj* permite ainda o exame visual da Tabela de Interseções das linhas de medida com as de controle, possibilitando a edição manual quando necessário. Por exemplo, a linha nivelada pode ser comparada à sua versão obtida em diferentes estágios do processo.

### 3.2.1.3 Micronivelamento

Após a rotina de nivelamento verificou-se que não foi necessária aplicação de processos de micronivelamento uma vez que o conjunto de dados não apresentou qualquer resíduo de “desnivelamento” que não tenha sido corrigido pelo nivelamento convencional.

#### 3.2.1.4 Correção do IGRF

A correção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF) obedeceu à rotina incluída no Sistema OASIS MONTAJ que consiste, basicamente, na definição da superfície de tendência que expressa o comportamento do campo geomagnético internacional na área do projeto.

Esta superfície foi definida com base no valor do IGRF, tendo sido considerada a altitude de média, referidos ao período do aerolevanteamento, em data juliana.

O campo magnético residual para cada um dos pontos amostrados foi obtido pela subtração, ao campo total micronivelado, do valor do IGRF calculado para cada amostra.

#### 3.2.1.5 Interpolação

Para obtenção da malha quadrada dos valores do campo magnético residual foi utilizado o programa BIGRID, que interpola dados distribuídos em perfis, paralelos ou subparalelos, usando *Akima* para interpolar primeiramente as amostras distribuídas ao longo das linhas de voo e *Cubic* na direção perpendicular às mesmas.

Este processo leva em conta a maior taxa de amostragem na direção das linhas de voo e a extensão lateral das feições mapeadas, observando-se forte correlação entre perfis laterais. No grid do modelo digital do terreno, utilizou-se a gridagem por mínima curvatura (RANGRID).

Os *grids* foram elaborados a partir de interpolação em malha quadrada, com as dimensões de 1500m x 1500m (equivale a ¼ do espaçamento das linhas). Alguns temas de *grids* são apresentados a seguir:

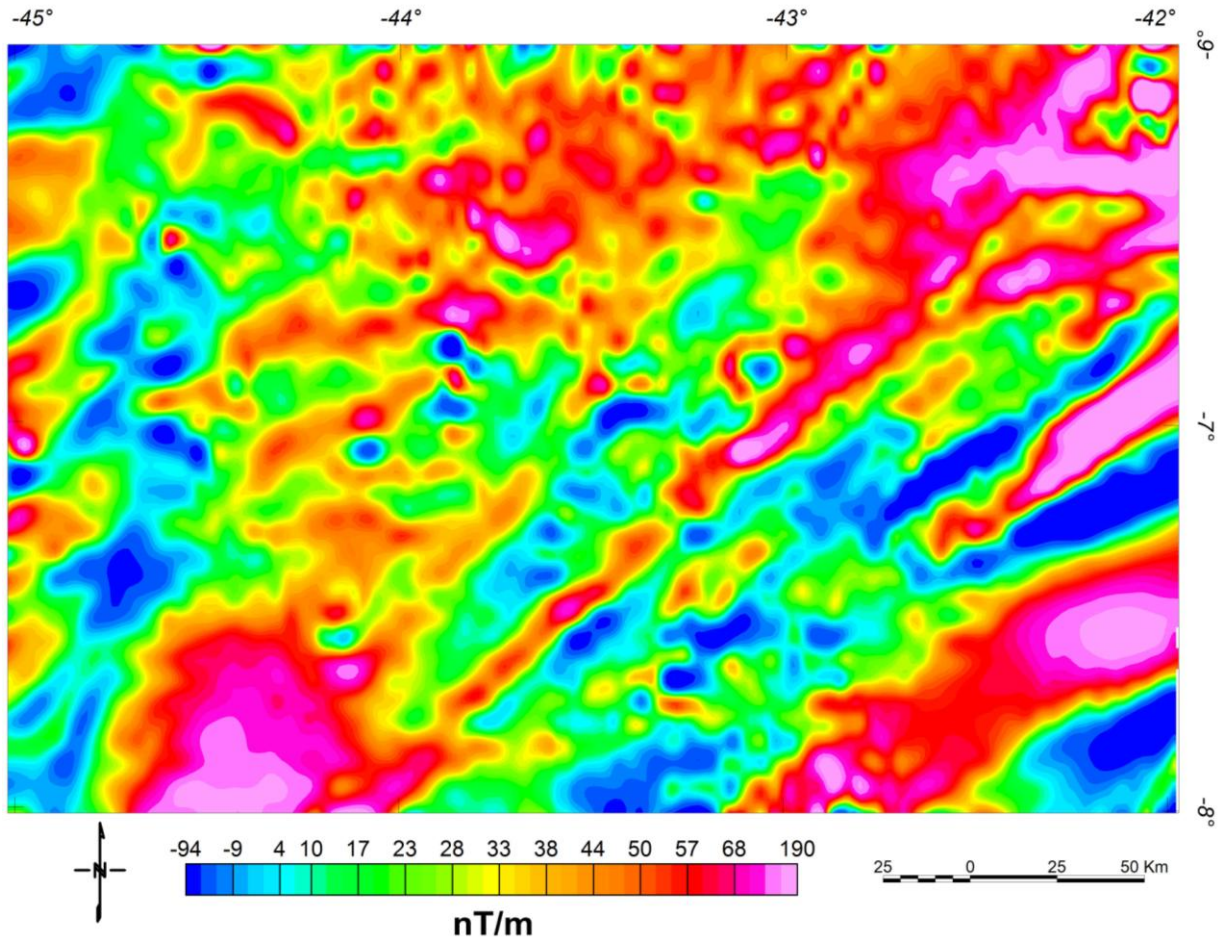
A Figura 13 apresenta o mapa da intensidade magnética total reduzido do *Intensive Geosciene referente field* (IGRF), processado com bases nos parâmetros acima citados.

O campo magnético residual para cada um dos amostrados foi obtido pela subtração, ao campo total micronivelado, do valor do IGRF calculado para cada amostra.

O Mapa do Campo Magnético Total removido do IGRF mostra uma compartimentação regional e profunda seguindo o trend estrutural de direção sudoeste-nordeste. Mesmo sem aplicação de filtros de realce, é possível observar a ocorrência de feições de alta frequência na porção leste e sudoeste do mapa, sendo que a sudoeste as feições

são mais delgadas e limitadas. De tal forma, esta técnica evidencia a forte presença das principais feições estruturais de âmbito regional da área em estudo.

Figura 13 – Mapa da Intensidade Magnética Total (Reduzido do IGRF).



Fonte: O autor, 2017.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar as transformações ou métodos de filtragem dos dados gravimétricos e magnéticos, com o intuito de realçar os aspectos espectrais dos dados medidos e processados.

Estes métodos aplicados contemplam os operadores de passa banda e de gradiente vertical, que são aplicados no domínio da frequência, usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), TELFORD. W.M., 1984 Eles são úteis para o realce qualitativo de anomalias relacionadas com corpos ou estruturas localizadas dentro de uma faixa de profundidade específica, ou para remover a energia espectral associada com ruídos ou elementos geológicos que não sejam de interesse.

### 4.1 Metodologia da Interpretação Qualitativa

A metodologia de interpretação qualitativa consiste em delinear sobre *grids* originais e sobre o resultado de diferentes transformações, a geometria espacial das principais feições geológicas de interesse da prospecção (VACQUIER, V.,1951). Saliente-se que os mapeamentos provenientes de dados de diferente natureza, gravimetria e magnetometria, bem como das diferentes bandas de frequência realçadas, visam a um zoneamento semi-quantitativo destas feições, porém, a definição de profundidades das fontes magnéticas necessitam de trabalhos adicionais de inversão e modelagem bidimensionais 2D e tridimensionais 3D dos dados que não são escopo do presente trabalho.

#### 4.1.1 Dados Magnetométricos Básicos

##### 4.1.1.1 Intensidade Magnética Total (TMI – *Total Magnetic Intensity*)

O *grid* TMI (*Total Magnetic Intensity*) foi utilizado como o ponto de partida para os realces de dados subsequentes (Primeira Derivada, Analítico Signal e Redução ao Pólo). A



análise qualitativa dos mapas de anomalias TMI permite obter informações significativas sobre a área mapeada. Os números de onda das anomalias magnéticas podem frequentemente ser relacionados com a profundidade das fontes anômalas em relação ao sensor magnético. Dado um mesmo tipo de rocha (susceptibilidades equivalentes), as anomalias com pequeno comprimento de onda são usualmente (mas nem sempre) causadas por fontes mais superficiais. Ao mesmo tempo, as variações no nível de base relativo magnético, podem ser uma indicação de variações regionais ou sub-regionais na litologia do embasamento. As variações devidas à presença de rochas ígneas intra-sedimentares ou intra-embasamento (tanto vulcânicas com intrusivas) também podem em geral ser reconhecidas (GRANT, F.S. & WEST, G.F., (1965)..

#### 4.1.1.2 Redução ao Pólo (RTP- *Reduce To Pole*)

Frequentemente a indução magnética a baixas latitudes distorce de tal forma o campo de intensidade magnética total que torna difícil definir os limites dos corpos geológicos magnéticos. Torna-se então necessário tentar obter uma melhor definição por redução ao pólo (RTP) do mapa magnético (WERNER, S, 1953)

Em alguns casos, a transformação pode ser tão drástica que talvez nem seja vantajoso realizá-la. A definição padrão para a operação de redução-ao-pólo (RTP) é a seguinte: “*A RTP remove a assimetria da anomalia magnética causada pelos efeitos da inclinação e declinação geomagnéticas provenientes do ‘campo central’ da Terra, e localiza as anomalias mais diretamente acima das feições/corpos geológicos causadores.*” (Li X., 2007).

Normalmente, os valores médios da inclinação (-13,51) e declinação magnéticos (-21,50) para a área do levantamento são usados para gerar o mapa de anomalias magnéticas RTP. Entretanto, a baixas latitudes, o algoritmo RTP (BLAKELY, 1996) padrão não opera efetivamente e introduz artefatos lineares ao longo da direção da declinação.

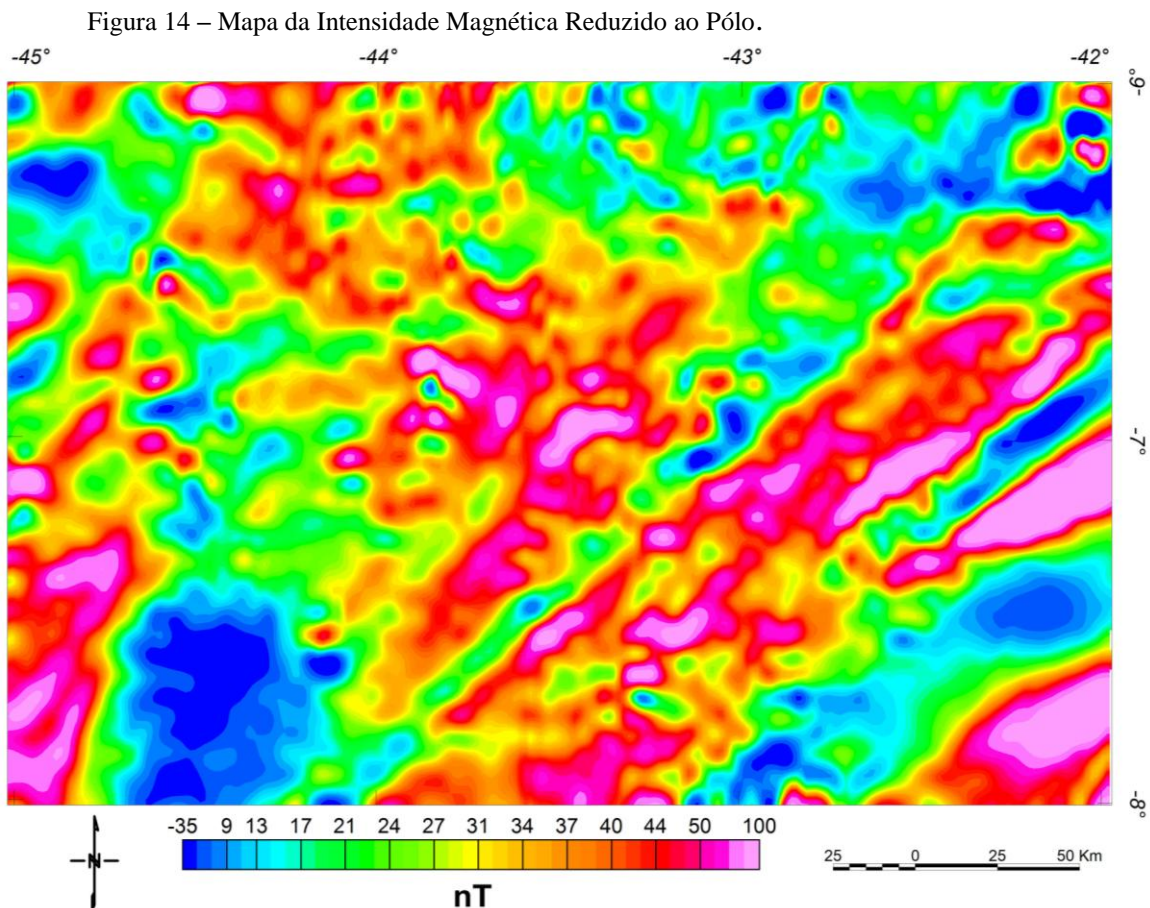
De um modo geral, anomalias RTP são mais simples para serem interpretadas que as anomalias do TMI ( *Total magnetic intensity*). O propósito do realce é de transformar o campo de anomalia magnética, observado de maneira que ele seja mais facilmente interpretável com a geologia causadora.

Dentre todos os algoritmos de redução ao pólo testados, as melhores transformações RTP foram as produzidas pelo algoritmo de *energy balance* de KEATING & ZERBO (1996). Usando o *software* proprietário LCT, a RTP pôde ser calculada no domínio da frequência a

partir de um algoritmo especial de estabilização que reposiciona com sucesso as anomalias sobre suas fontes causadoras a menos que cinco graus de latitude magnética (Li, 2007). Outras técnicas RTP a baixas latitudes, incluindo a pseudoinclinação, a filtragem azimutal e filtragem Wiener-estabilizada, não conseguiram atingir resultados comparáveis.

No presente estudo, a transformação RTP de anomalia magnética foi gerada usando o algoritmo do *energy balance* de KEATING & ZERBO (1996).

Mapa da Intensidade Magnética Total Reduzido ao Pólo, Figura 14 (TMI\_RTP) reflete uma complexidade estruturação dos alinhamentos magnéticos, com direção preferencial sudoeste para nordeste e em outra direção noroeste para sudeste da área de estudo que será determinante na interpretação geológico-estrutural.



Fonte: O autor, 2017.

#### 4.1.1.3 Sinal Analítico (Gradiente total do TMI)

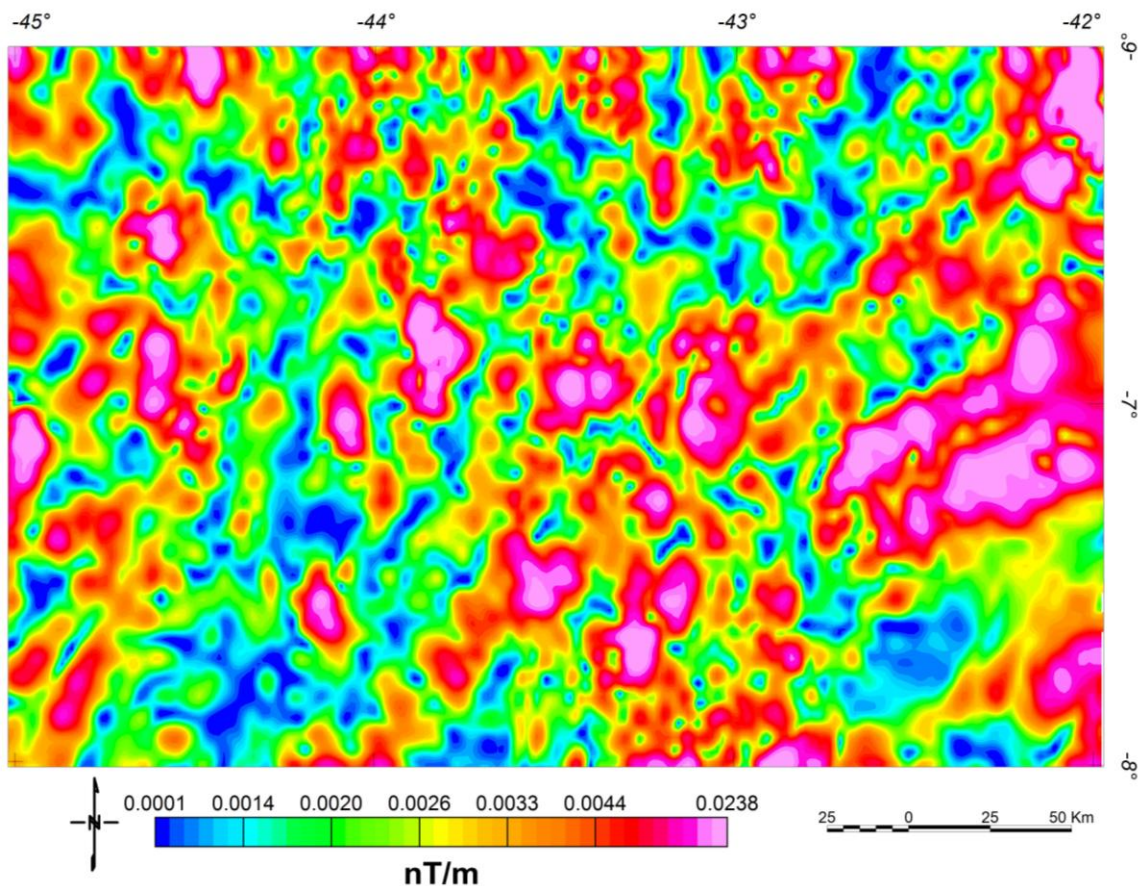
O mapa do sinal analítico foi calculado a partir do RTP. O cálculo a partir da TMI é usualmente feito como uma verificação comparativa para a transformação RTP. Entretanto, o

gradiente total resulta em maior amplificação do ruído que no gradiente horizontal, porque envolve mais uma derivada e portanto deve ser usado com certo grau de precaução. A amplitude do gradiente total,  $T$ , do campo gravimétrico ou magnético,  $F$ , para os propósitos de um mapa com duas dimensões é:

$$T = [ ( F / x )^2 + ( F / y )^2 + ( F / z )^2 ]^{1/2} \quad (1)$$

A transformação do gradiente total (sinal analítico) do TMI é considerada muito importante por ser independente da inclinação do campo nestas condições. Como tal serviria também para confirmar o resultado da transformação RTP. Como resultado, segue o mapa apresentado na Figura 15 com as feições circulares e/ou alongadas de alta intensidade magnética que podem corresponder a rochas intrusivas pela amplitude do sinal analítico com uma tendência controlada pelas estruturas geológicas observadas na Figura 14.

Figura 15 – Mapa do Sinal Analítico (Gradiente Total do TMI\_RTP).



Fonte: O autor, 2017.



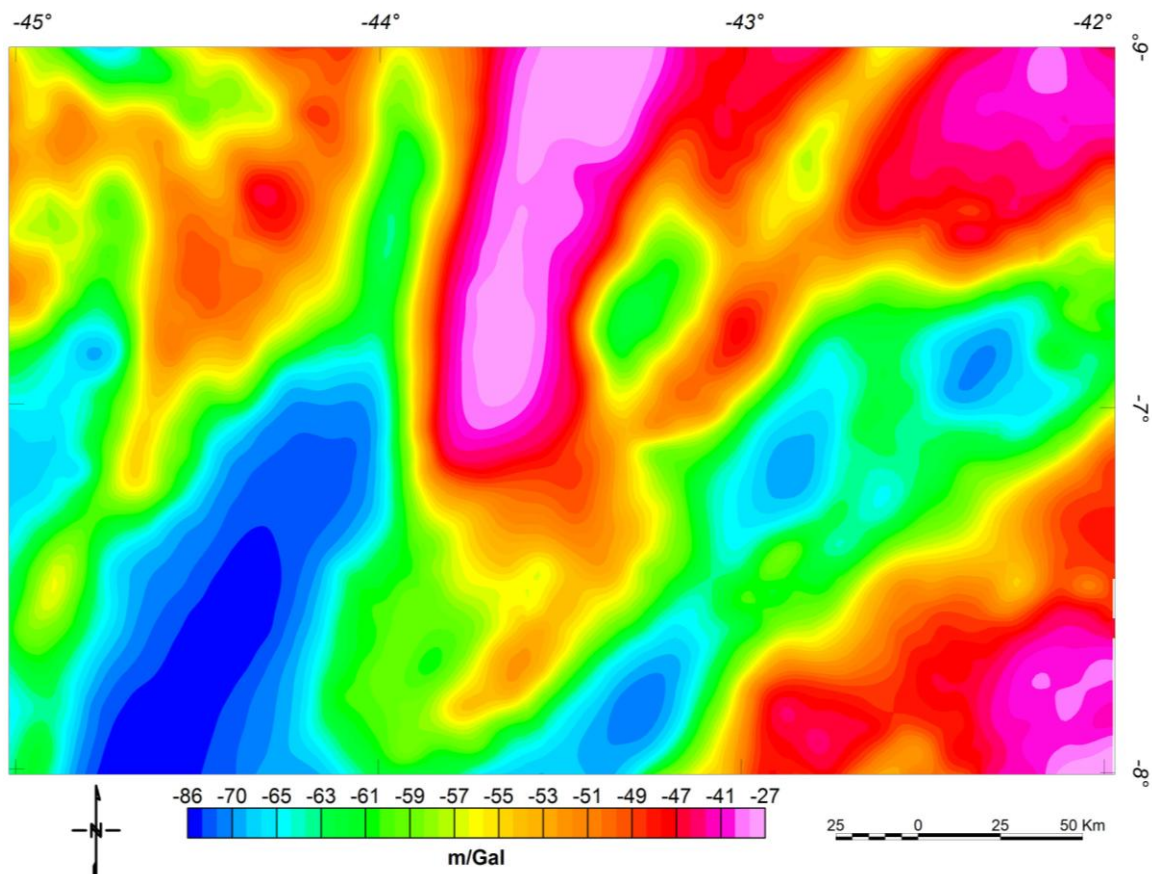
#### 4.1.2 Dados Gravimétricos Básicos

##### 4.1.2.1 Gravidade Bouguer

As variações de densidade da seção sedimentar, a crosta, e feições mais profundas tais como ondulações no *Moho*, as anomalias *Bouguer* são mais diretamente relacionadas com as variações litológicas e estruturais (LAFEHR AND NABIGHIAN. Para gerar um mapa de gravidade *Bouguer*, deve ser feita uma correção Bouguer. Tal correção deve remover o efeito da gravidade, muitas vezes significativo, devido às variações topográficas. As densidades de correção podem variar desde  $1,90 \text{ g/cm}^3$  para sedimentos rasos até  $2,7 \text{ g/cm}^3$  para rochas da crosta em terra (J. H. SCHON).

O sucesso de tal redução *Bouguer* depende da densidade de correção utilizada, que deve ser igual à densidade da sequência sedimentar mais rasa. Neste estudo, a Correção Bouguer de  $2,67 \text{ g/cm}^3$  foi utilizada em função da análise do mapa de geologia superficial da área do levantamento, apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Mapa da anomalia Bouguer.



Fonte: O autor, 2017.

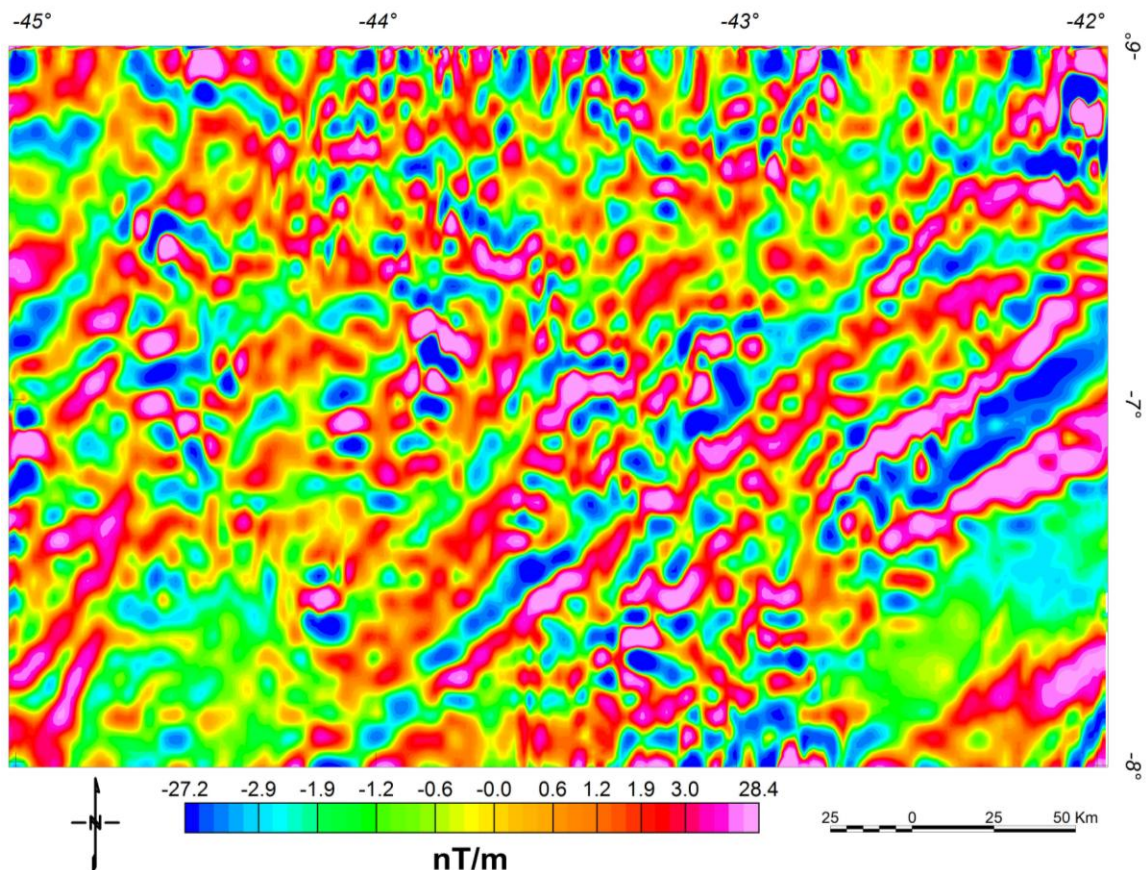
## 4.2 Realces Aplicados aos Dados Gravimétricos e Magnetométricos

### 4.2.1 Primeira Derivada Vertical (FVD)

A primeira derivada vertical realça anomalias gravimétricas e magnéticas (Figura 17) com pequeno comprimento de onda, tais como aquelas causadas por feições sedimentares e de embasamento raso, e suprime as anomalias de grandes comprimentos de onda que se originam de feições profundas e/ou regionais. Considerando que a exploração de hidrocarbonetos está focalizada principalmente na seção sedimentar e na estrutura do “embasamento subjacente”, pode ser um realce muito útil. Entretanto, devido ao fato das derivadas espaciais realçarem a energia espectral dos pequenos comprimentos de onda, os ruídos de pequenos comprimentos de onda também são amplificados. Numericamente, a primeira derivada vertical dos campos da gravidade e magnético,  $F$ , é:

$$FVD = \partial F / \partial z \quad (2)$$

Figura 17\_– Mapa da Primeira Derivada Vertical do TMI.



Fonte: O autor, 2017.

#### 4.2.1.2 Filtragens de Passa-Alta, Passa-Baixa e Passa Banda

Estes filtros são de corte de banda. Os termos "Passa-Alta", "Passa-Baixa" e "Passa-Banda" estão relacionados, em geofísica, à frequência (Figura 18).

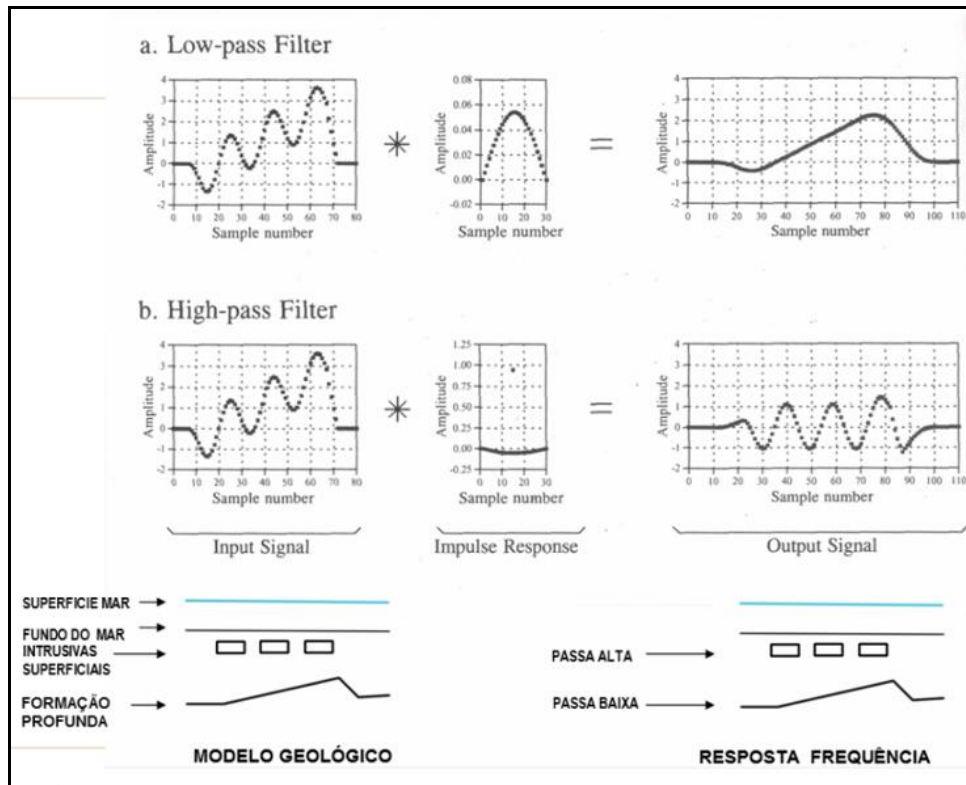
Sendo assim, a filtragem "Passa-Alta" permite que as altas frequências não sejam filtradas. As altas frequências representam fontes de anomalias rasas. Entretanto, os ruídos externos também são representados neste comprimento de onda. Já a filtragem "Passa-Baixa" permite que as baixas frequências não sejam filtradas. Com isso, são salientados os comprimentos de onda longos, que são provenientes de fontes profundas.

Por fim, a filtragem "Passa-Banda" normalmente é realizada para representar intervalos de frequência pré-selecionados em função de representarem alguma feição geológica de interesse ou mesmo de extrair faixas de frequência de maior ou menor confiabilidade.

Quando um filtro de passa alta é aplicado a um mapa anomalia de gravidade Bouguer, por exemplo, é usualmente efetivo para isolar as anomalias de gravidade originadas no embasamento e nos intervalos sedimentares da interferência causados pelas ondulações Moho mais profundas e pelas mudanças de densidade da crosta (associadas com *rifting* e com processos magmáticos na crosta inferior). Estas últimas anomalias de interferência tendem a ser amplas (~60 km) e, desta forma facilmente separáveis das anomalias mais locais (<60 km - rochas ígneas ou carbonáticas próximas do embasamento) por um filtro de passa alta.

Considerando o exposto acima, este corte com limite superior em 60 km de comprimento de onda também serviu para extrair do mapa Bouguer os comprimentos de onda com erro inferior a 1 mGal, tal como é possível observar no gráfico da Figura 18, restringindo as frequências extraídas às frequências de maior precisão e de maior interesse exploratório.

Figura 18 – Gráficos com modelo e resposta de frequência dos filtros



Fonte: BLAKELY, R. J., 1995.