



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

DIVANIR CONEGO JUNIOR

**INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA DO BATÓLITO DE CATOLÉ DO ROCHA PB-RN,  
BRASIL**

Recife

2019

DIVANIR CONEGO JUNIOR

**INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA DO BATÓLITO DE CATOLÉ DO ROCHA PB-RN,  
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Geociências.

**Área de Concentração:** Geoquímica,  
Geofísica e Evolução Crustal.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vanessa Biondo Ribeiro

**Coorientador:** Prof. Dr. João Adauto de Souza Neto

**Coorientador:** Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

C747i Conego Junior, Divanir.  
Interpretação geofísica do Batólito de Catolé do Rocha PB-RN, Brasil / Divanir  
Conego Junior. - 2019.  
95 folhas, il., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Vanessa Biondo Ribeiro.  
Coorientador: Prof. Dr. João Aduino de Souza Neto.  
Coorientador: Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2019.  
Inclui Referências.

1. Geociências. 2. Batólito de Catolé do Rocha. 3. Interpretação geofísica. 4. Inversão. 5. Magnetometria. 6. Gamaespectrometria. I. Ribeiro, Vanessa Biondo (Orientadora). II. Souza Neto, João Aduino de (Coorientador). III. Louro, Vinicius Hector Abud (Coorientador). IV. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-430

DIVANIR CONEGO JUNIOR

**INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA DO BATÓLITO DE CATOLÉ DO ROCHA PB-RN,  
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Geociências.

Aprovada em: 09/08/2019

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro (Coorientador)  
Universidade de São Paulo

---

Prof. Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr. Roberto Gusmão de Oliveira (Examinador Externo)  
Serviço Geológico do Brasil

À família que me criou e a grande família que adquiri durante esta caminhada, sem o apoio de vocês nada disso seria possível.

## AGRADECIMENTOS

Os anos de geofísica me mostraram que o mais importante é ter pessoas que se importam com você, que o apoio mútuo para conquistar juntos é mais importante que o conquistar sozinho. Um porto não é só caracterizado apenas pelas construções, mas necessita de todas as embarcações que nele aportam deixando e levando algo. Desta forma construí minha segunda família, que por mais distantes que estejam, contribuem sempre para meu crescimento. Não cabe aqui nomeá-los, pois sabem quem são e como contribuíram. Esta dissertação é dedicada a vocês, que sempre me auxiliaram e estiveram abertos a discutir coisas mundanas e geofísicas. Meu muito obrigado.

Agradeço à minha família, que sempre me deu suporte, apoio incondicional mesmo sem saber lhufas do que eu faço e às vezes até não acreditando muito... Muito obrigado por tudo pai, mãe e irmã.

À minha namorada, pela paciência e todas as palavras de incentivo quando tudo parecia que ia dar errado e por quando tudo começou a dar certo. Muito obrigado.

À minha orientadora, Vanessa Biondo Ribeiro, que mesmo distante sempre esteve próxima para todas as dúvidas, questionamentos e sempre conseguiu tirar o melhor de mim. Sem sua ajuda nada disso seria possível.

Aos meus coorientadores, Adauto e Vinicius, que contribuíram em épocas distintas para o meu trabalho e me moldaram para que a dissertação fosse um orgulho para mim e minha família.

Ao amigo Jim e Joe, sem nossas discussões sobre a vida, geofísica, interpretações e seus resultados, essa caminhada não seria tão alegre. Garanto que este contato sempre serviu para que eu continuasse lutando e tentando melhorar sempre. Peço desculpas por, às vezes, ser tão prolixo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGEOC/UFPE), pela oportunidade de desenvolver esta dissertação de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa de estudo, sem ela não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

À professora Leila, que sempre acreditou em mim e incentivou, mesmo quando não precisava.

Ao técnico do IAG-USP, Roberto Zanon, pelas conversas proveitosas, as ajudas nos softwares e as constatações sobre coisas “xexelentas”.

Ao professor Chiquinho, pelos conhecimentos transmitidos, às taças de vinho regadas a muito bom humor e as ajudas em instrumentação geofísica e por repassar seu conhecimento sobre o funcionamento dos métodos.

Aos amigos de IAG, Raphael (Rapha Prieto), Marcão, Daniel (Ketchup), Cassiano (Pira), Emerson (Alasão), Vinicius (Bundão), David (Mazza), Rafael (Romário), Luiz (Santas), Rodrigo (Samões), Andrézinho, Igor (Baballo), Daniel (Tião), Victor (Vivi), dentre outros, nossas conversas regadas ao facilitador social foram muito proveitosas durante esses anos.

Ao amigo Daniel, companheiro de reclamações sobre a vida cotidiana e pelos momentos de descontração, aprendizado e por nos guiar em Natal-RN.

Ao Laboratório de Gravimetria e Geomagnetismo do IAG-USP, por permitir que eu utilizasse o espaço físico e os seus softwares.

Ao IAG-USP por permitir que utilizasse a biblioteca e a salinha do café, sem o café essa trajetória seria muito mais complicada.

Ao técnico Marcelo por todas as conversas nas tardes de IAG, e por todo o bom senso que demonstrou nesses anos todos que o conheço.

Aos técnicos Dennis e Edilson por sempre fornecerem a senha de internet e ajudarem a resolver todos os pepinos que apareciam.

Por fim agradeço aos amigos da salinha da pós da UFPE, por toda ajuda e informações que me passaram nesses dois anos.

Sem todos vocês essa caminhada teria se tornado ainda mais árdua e complicada. Cada um contribuiu de forma significativa em cada processo da preparação desta dissertação.

Muito obrigado!

*“Ultimately their aim is to make an image ‘look good’”*  
(Kovesi, P., 2012, p.01)

## RESUMO

O Batólito de Catolé do Rocha (BCR) está localizado na região oeste do Domínio Rio Grande do Norte e conta com mais de 700 km<sup>2</sup> de área aflorante. É composto por três fácies internas: Alexandria, Brejo dos Santos e Maniçoba, por diques de leuco-microgranitos, e por uma suíte máfica/intermediária composta predominantemente por dioritos, onde todas as fácies possuem assinaturas geofísicas pronunciadas. Esta pesquisa tem por objetivo a caracterização geofísica da área do BCR através dos métodos de magnetometria e gamaespectrometria. A interpretação destes métodos possibilitou a definição dos limites do BCR e lineamentos da área com orientação NE-SW. Dados radiométricos permitiram definir as fácies do batólito e possíveis ocorrências de alteração hidrotermal na área. No interior do batólito foram interpretadas três anomalias magnéticas com características normais, denominadas de Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso. A modelagem das anomalias indicou contrastes de susceptibilidades magnéticas variando de 0,0070 a 0,0711 SI, com profundidades de 0 a até 400 metros, alinhadas segundo a direção NE-SW. Com base na geologia da região, em assinaturas e modelos geofísicos, as fontes das anomalias foram interpretadas como dioritos. Os alojamentos de tais corpos podem ter aproveitado a fraqueza crustal gerada pelo Lineamento Caicó-Bom Jesus, facilitando sua migração e encaixe ou a partir de *underplating* basáltico, que forneceu indicativos de magma parental para a gênese dos corpos anômalos e do BCR. Duas áreas de interesse exploratório foram sugeridas: a primeira na região entre os corpos dioríticos da anomalia de Maniçoba e a segunda no corpo 3 da anomalia de Bom Sucesso, existindo a possibilidade de ocorrência de minerais associados a corpos pegmatitos, comuns nessa região e associados a corpos graníticos.

**Palavras-chave:** Batólito de Catolé do Rocha. Interpretação geofísica. Inversão. Magnetometria. Gamaespectrometria.

## ABSTRACT

The Catolé do Rocha Batholith (BCR) is located in the west region of the Rio Grande do Norte domain and has more than 700 km<sup>2</sup> of outcrop area. It is composed of three internal facies: Alexandria, Brejo dos Santos and Maniçoba; by dikes of micro-leucogranites, and by a suite mafic/intermediary predominantly made of diorites, where all facies have pronounced geophysical signatures. This research aims at the geophysical characterization of the BCR area using the magnetic field and  $\gamma$ -ray spectrometry methods. Their interpretation allowed defining of BCR boundaries and the regional NE-SW lineaments. Radiometric data displayed the facies of the batholith and possible occurrences of hydrothermal alteration in the area. Within the batholith, three magnetic anomalies of normal polarities were interpreted, namely Maniçoba, Brejo dos Santos and Bom Sucesso. The magnetic field models of the three anomalies indicated contrasts of magnetic susceptibilities varying from 0.0070 to 0.0711 SI, with the depths from 0 to 400 meters, aligned with the NE-SW regional trend. Based on the geology of the region and geophysical models, the sources of the anomalies were interpreted as diorites. The intrusions of these bodies may have taken advantage of the crustal weakness generated by the Caicó-Bom Jesus Lineament, which facilitated magma migration and fitting, and/or from basaltic underplating, that could have provided the parental magma for the genesis of both the anomalous bodies and the BCR. Two areas of exploratory interest are suggested: the first in the region between the diorite bodies of the Maniçoba anomaly and the second one in the body 3 of the Bom Sucesso anomaly, where there is the possibility of occurrence of minerals associated with pegmatites bodies, common in this region and associated with granite bodies.

**Keywords:** Catolé do Rocha Batholith. Geophysicist interpretation. Inversion. Magnetometry. Gamma ray.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa geológico simplificado da região setentrional da Província Borborema, bem como a localização da área de estudo (polígono preto).....	17
Figura 2 – Mapa geológico simplificado do Domínio Rio Grande do Norte, demonstrando a ocorrência de magmatismo do Ediacarano ao Cambriano.....	19
Figura 3 – Mapa geológico do Batólito de Catolé do Rocha, demonstrando a área de pesquisa, as principais unidades geológicas da área, as fácies e as principais ocorrências minerais. ....	20
Figura 4 – Demonstração do comportamento das radiações alfa, beta e gama. ....	24
Figura 5 – Espectro da radiação gama mostrando as faixas de energia de urânio, tório, potássio e a contagem total a qual estão inseridos. ....	25
Figura 6 – Variação do espectro de minério de urânio demonstrando a variação da contagem em função da cobertura de água.....	26
Figura 7 – Gráfico das concentrações dos radioelementos K, U, Th versus o incremento de sílica em rochas ígneas. ....	28
Figura 8 – Procedimento de redução ao polo (RTP) de anomalia magnética quando o CMT não é vertical. ....	38
Figura 9 – Localização dos projetos aerogeofísicos 1091 e 1092 integrados em relação ao Brasil no polígono preto achurado e a localização da área de pesquisa no polígono vermelho.....	44
Figura 10 – Mapa do campo magnético anômalo (CMA), obtido a partir dos dados aero-magnéticos disponibilizados pela CPRM para os projetos aerogeofísicos 1091 – Pernambuco-Paraíba e 1092 – Paraíba – Rio Grande do Norte, com a área de pesquisa no polígono pontilhado e as anomalias escolhidas para a caracterização 3D.....	45
Figura 11 – Mapa ternário de K, Th e U obtidos a partir dos projetos aerogeofísicos 1091 – Pernambuco – Paraíba e 1092 – Paraíba – Rio Grande do Norte, com a área de pesquisa no polígono pontilhado em preto e as anomalias escolhidas para a caracterização 3D.....	46
Figura 12 – Mapa da distribuição espacial das contagens individuais de urânio para a área de pesquisa. ....	47
Figura 13 – Mapa da distribuição espacial das contagens individuais de tório para a área de pesquisa. ....	49
Figura 14 – Mapa da distribuição espacial das contagens individuais de potássio para a área de pesquisa. ....	49

Figura 15 – Mapa de visualização ternária dos radioelementos U, Th e K (Coloração R, G, B = K, Th, U). .....	51
Figura 16 – Mapa da distribuição espacial da razão urânio/tório (U/Th).....	53
Figura 17 – Mapa da distribuição espacial da razão urânio/potássio (U/K).....	54
Figura 18 – Mapa da distribuição espacial da razão tório/potássio (Th/K).....	55
Figura 19 – Mapa de distribuição do parâmetro F na área de pesquisa. ....	56
Figura 20 – Mapa de distribuição do potássio anômalo (K anômalo) (A) e urânio anômalo (U anômalo) (B) na área de pesquisa.....	57
Figura 21 – Mapa do campo magnético anômalo (CMA) para a região de pesquisa.....	58
Figura 22 – Mapa do campo magnético residual (CMR) representando a variação da medida magnetométrica para a região de pesquisa com a contribuição de estruturas profundas reduzida a partir da continuação para cima a uma altura de 2000 metros. ....	60
Figura 23 – Mapa da amplitude do gradiente total (TGA) representando a amplitude do gradiente da anomalia magnetométrica para a região de pesquisa. ....	61
Figura 24 – Perfis de TGA das anomalias de Maniçoba (A), Brejo dos Santos (B) e Bom Sucesso (C). ....	63
Figura 25 – Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) da área de pesquisa. ....	64
Figura 26 – Mapa da interpretação dos principais lineamentos magnéticos da inclinação do sinal analítico (ISA) com transparência de 50%. ....	64
Figura 27 – Diagrama de roseta obtido com base na interpretação de 933 lineamentos magnéticos obtidos a partir da inclinação do sinal analítico (ISA) demonstrando as direções preferenciais dos lineamentos magnéticos.....	65
Figura 28 – Mapas do dynamic range compression (DRC) demonstrando a variação espacial das componentes dos comprimentos de onda, onde células de 12 metros de lado foram utilizadas como ponto de partida.....	67
Figura 29 – Mapa do índice máfico (IM) demonstrando a ocorrência de rochas intermediárias a máficas em terreno félsico livre da contribuição de coberturas sedimentares através da normalização da amplitude do gradiente total pelos radioelementos U, Th e K. ....	68
Figura 30 – Mapa da anomalia de Maniçoba, demonstrando a variação dos dados geofísicos e do mapa geológico da área bem como as convenções geológicas. ..	70
Figura 31 – Gráfico da continuação para cima versus o índice estrutural para a anomalia de Maniçoba.....	71

Figura 32 – Mapa da TGA para a anomalia magnética de Maniçoba com os respectivos resultados das profundidades obtidas através da deconvolução de Euler.....	71
Figura 33 – Modelo 3D de susceptibilidade magnética da anomalia de Maniçoba. ....	73
Figura 34 – Mapa do CMR da anomalia de Maniçoba.....	74
Figura 35 – Mapa da anomalia de Brejo dos Santos, demonstrando a variação dos dados geofísicos e do mapa geológico da área bem como as convenções geológicas. ....	75
Figura 36 – Gráfico da continuação para cima versus o índice estrutural para a anomalia de Brejo dos Santos.....	76
Figura 37 – Mapa da Amplitude da Derivada Total (TGA) bem como os limites laterais interpretados da anomalia magnética de Brejo dos Santos com os respectivos resultados das profundidades obtidas através da deconvolução de Euler.....	76
Figura 38 – Modelo 3D de susceptibilidade magnética da anomalia de Brejo dos Santos. ....	77
Figura 39 – Mapa do CMR da anomalia de Brejo dos Santos. ....	78
Figura 40 – Mapa da anomalia de Bom Sucesso, demonstrando a variação dos dados geofísicos e do mapa geológico da área bem como as convenções geológicas. ....	79
Figura 41 – Gráfico da continuação pra cima versus o índice estrutural para a anomalia de Bom Sucesso, demonstrando o comportamento do índice estrutural, obtido pela deconvolução de Euler localizada, com o aumento da altura da continuação pra cima.....	81
Figura 42 – Mapa da TGA para a anomalia magnética de Bom Sucesso com os respectivos resultados das profundidades obtidas através da deconvolução de Euler.....	81
Figura 43 – Modelo 3D de susceptibilidade magnética da anomalia de Maniçoba ....	82
Figura 44 – Mapa do CMR da anomalia de Bom Sucesso.....	84
Figura 45 – Mapa com os modelos 3D obtidos a partir da caracterização 3D dos parâmetros físicos das anomalias de Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso. ....	85

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Índices estruturais e as principais geometrias das fontes dos sinais magnéticos... 39

Tabela 2 – Susceptibilidades magnéticas dos principais tipos de rochas da crosta terrestre. ..41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	OBJETIVOS .....	16
<b>2</b>	<b>ASPECTOS GEOLÓGICOS</b> .....	17
2.1	PROVÍNCIA BORBOREMA .....	17
2.2	DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE.....	18
2.3	ÁREA DA PESQUISA .....	20
<b>2.3.1</b>	<b>Batólito Catolé do Rocha</b> .....	21
<b>2.3.2</b>	<b>Aspectos Geoquímicos do Batólito de Catolé do Rocha</b> .....	21
<b>3</b>	<b>MÉTODOS</b> .....	23
3.1	GAMAESPECTROMETRIA.....	23
<b>3.1.1</b>	<b>Teoria</b> .....	23
<b>3.1.2</b>	<b>Interferências nas Medidas Aerogamaespectrométricas</b> .....	25
<b>3.1.3</b>	<b>Comportamento Geoquímico do Urânio, Tório e Potássio</b> .....	27
<b>3.1.4</b>	<b>Correções Aerogamaespectrométricas</b> .....	28
<b>3.1.5</b>	<b>Técnicas Utilizadas na Interpretação Gamaespectrométrica</b> .....	30
3.2	MAGNETOMETRIA .....	32
<b>3.2.1</b>	<b>Teoria</b> .....	32
<b>3.2.2</b>	<b>Correções aeromagnéticas</b> .....	34
<b>3.2.3</b>	<b>Técnicas Utilizadas na Interpretação Magnetométrica</b> .....	36
3.3	INVERSÃO DOS DADOS MAGNÉTICOS .....	40
<b>4</b>	<b>DADOS GEOFÍSICOS</b> .....	44
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	47
5.1	GAMAESPECTROMETRIA.....	47
5.2	MAGNETOMETRIA .....	58
5.3	INTERPRETAÇÃO CONJUNTA: ANOMALIAS SELECIONADAS .....	69
<b>5.3.1</b>	<b>Anomalia de Maniçoba</b> .....	69
<b>5.3.2</b>	<b>Anomalia de Brejo dos Santos</b> .....	74
<b>5.3.3</b>	<b>Anomalia de Bom Sucesso</b> .....	78
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	87
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	89
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	90

## 1 INTRODUÇÃO

A região de pesquisa está localizada na região oeste do Domínio Rio Grande do Norte, entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Esta área apresenta como foco principal o batólito de Catolé do Rocha com idade U-Pb de 571 Ma (MEDEIROS et al., 2008). O batólito é composto por três fácies de composição granítica, um corpo de composição máfica/intermediária isolado no interior de uma das fácies. Ainda em seu interior, o batólito apresenta três anomalias geofísicas pronunciadas. Uma das anomalias é coincidente com uma das fácies e as outras não são reportadas em mapas geológicos ou trabalhos na área. A caracterização geofísica dessas anomalias pode fornecer áreas para novos estudos, informações adicionais para o futuro entendimento da região e possíveis áreas estratégicas para exploração mineral, principalmente elementos associados a pegmatitos, como urânio, lítio dentre outros, além de pedras semipreciosas como a água-marinha, coríndon etc.

A região externa ao batólito conta com idade predominantemente paleoproterozoica com estruturas NE-SW, porém com orientações distintas: N30E e N60E identificadas a partir de processamento geofísico. As primeiras estão localizadas predominantemente a noroeste do batólito, enquanto as últimas se encontram na região sudeste. As características da área são marcantes e contam ainda com poucos trabalhos exploratórios, geológicos e geofísicos.

Diante de tais características, o detalhamento geofísico por magnetometria e gamaespectrometria pode contribuir na caracterização dos limites laterais dos corpos graníticos. As caracterizações magnéticas destas regiões ocorrem em virtude de contrastes de susceptibilidade magnética e/ou magnetização em rochas adjacentes, associados, em rochas, a minerais ferromagnéticos como magnetita, ilmenita e hematita. Tal característica favorece a identificação de padrões dos contornos dos limites laterais dos corpos graníticos e é complementada por concentrações específicas de radioelementos. Possibilita ainda compreender o caráter tectônico no qual ocorreu o alojamento do corpo granítico, evidenciado por lineamentos magnéticos. A gamaespectrometria pode ser utilizada na identificação de regiões que possam ter sofrido diferenciação magmática. Isso ocorre através da variação da concentração superficial dos radioelementos no interior dos corpos geológicos.

Este projeto de pesquisa tem como foco investigar geofisicamente o Batólito de Catolé do Rocha (BCR) e áreas adjacentes. As informações aqui obtidas podem auxiliar em possíveis novas campanhas de mapeamento geológico da região, diminuindo o número de áreas específicas a serem analisadas, facilitando a tomada de decisões e, por consequência, o tempo de ação em campo.

## 1.1 OBJETIVOS

O projeto de pesquisa tem como objetivo geral a caracterização geofísica do Batólito de Catolé do Rocha, identificando as principais feições tectônicas a partir da geofísica e buscando interpretações geofísicas que contribuam para o refinamento científico da região de estudos, visto que a área não conta com trabalhos geofísicos de detalhe.

Com isso os objetivos específicos são:

- Processamento e interpretação dos dados geofísicos aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos da área de pesquisa;
- Seleção de anomalias geofísicas associadas ao batólito para a caracterização detalhada;
- Processamento e interpretação das anomalias geofísicas selecionadas;
- Construção de modelo tridimensional do contraste de propriedade física das anomalias selecionadas;
- Interpretação dos modelos tridimensionais;
- Proposição de áreas de relevante interesse mineral.

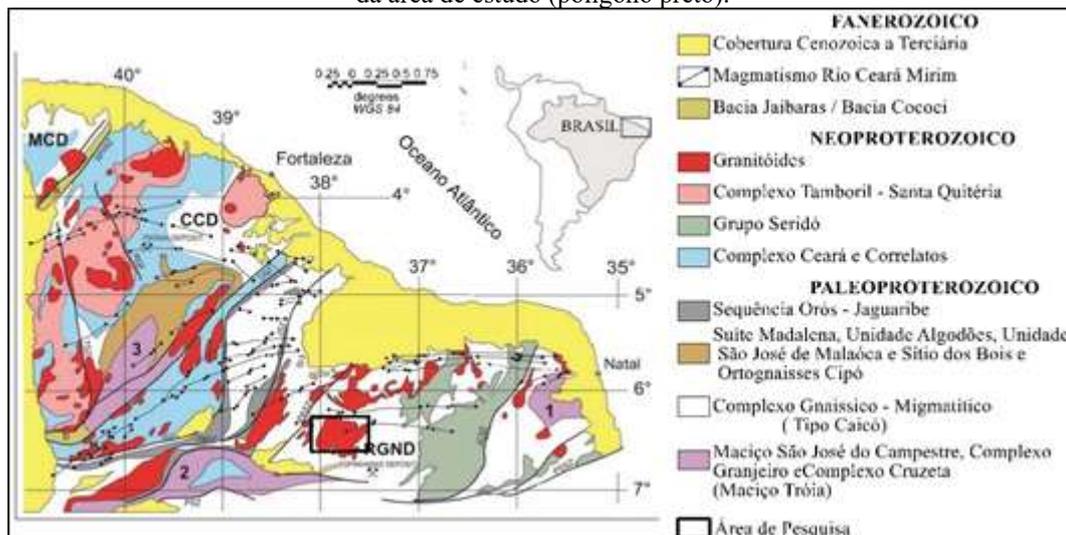
## 2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A região foco deste trabalho é o Batólito de Catolé do Rocha, com área aflorante que ultrapassa 700 km<sup>2</sup> e inserida na região oeste do Domínio Rio Grande do Norte, parte da Província Borborema (ALMEIDA et al., 1977, 1981).

### 2.1 PROVÍNCIA BORBOREMA

A Província Borborema engloba vários estados do nordeste brasileiro e possui área que excede 450 mil km<sup>2</sup> (BRITO NEVES, 1978). É limitada a norte e a leste pelas bacias costeiras do Ceará, Potiguar, Paraíba-Pernambuco e Sergipe-Alagoas. A sul é limitada pelo Cráton São Francisco e a oeste pela Bacia do Parnaíba (Figura 1).

Figura 1 – Mapa geológico simplificado da região setentrional da Província Borborema, bem como a localização da área de estudo (polígono preto).



Nota: MCD – Domínio Médio Coreau; CCD – Domínio Ceará Central; RGND – Domínio Rio Grande do Norte.

Fonte: Adaptado de Arthaud et al. (2008).

A Província Borborema é classificada como uma faixa colisional complexa, originada pela interação dos crátons do Oeste da África, Congo-São Francisco e Amazônia há cerca de 600 Ma, e adjacentes aos cinturões Pan-Africano e terrenos cratônicos no oeste da África (BRITO NEVES et al., 2002; CABY et al., 1981, 1989; JARDIM DE SÁ, 1984). Sua evolução ocorreu com a aglomeração de diversas microplacas e, com isso, terrenos possivelmente foram consolidados no final do ciclo Brasileiro/Pan-Africano, originando uma das mais importantes províncias estruturais brasileiras.

A Província Borborema possui embasamento de idade predominantemente paleoproterozoica, com remanescentes arqueanos, sequências metavulcânicas e

metassedimentares (ANGELIM et al., 2006). A fase evolutiva da Província Borborema é interpretada como superposição de três grandes eventos orogênicos (BERTRAND; JARDIM DE SÁ, 1994; BRITO NEVES et al., 2000; BRITO NEVES; SANTOS, 2006), que propiciaram sua formação, evolução e maturação como uma grande província estrutural.

O primeiro evento, denominado de Orogênese Riacciana (BRITO NEVES; SANTOS, 2006), foi responsável pela aglutinação de núcleos Arqueanos pré-existentes, retrabalhamento e acreção crustal. O segundo evento, Cariris Velhos, responsável pela intrusão de granitos, sequências metassedimentares e metavulcanoclásticas, que representariam um ciclo orogênico completo (BRITO NEVES et al., 2001; KOZUCH, 2003). Porém, alguns autores sugerem que a Província Borborema no final do paleoproterozoico possuía características cratônicas, e consideram o ciclo Cariris Velhos como gerador de magmatismo (GUIMARÃES et al., 2012; NEVES; MARIANO, 2001).

O terceiro ciclo, denominado Brasiliano/Pan-Africano, culminou na aglutinação dos blocos cratônicos São Francisco/Congo, São Luís/Oeste da África e Amazônico (650-580 Ma). Este último evento orogênico de grandes proporções afetou a província, e foi acompanhado por intenso plutonismo granítico com intervalo de aproximadamente 100 Ma (GUIMARÃES et al., 2004) e desenvolvimento de rede de zonas de cisalhamento transcorrentes extensas (BRITO NEVES et al., 2000). As intrusões graníticas em sua maioria estão associadas com zonas de cisalhamento de direção NE-SW (NEVES; VAUCHEZ, 1995).

A Província Borborema é separada em três grandes segmentos tectônicos, os quais são limitados por importantes zonas de cisalhamento brasileiras (Figuras 1 e 2): as zonas de cisalhamento Patos e Pernambuco separam o Domínio Central a norte do Domínio Setentrional e a sul do Domínio Meridional. Estes domínios por sua vez foram subdivididos com relação a litoestratigrafia, feições estruturais, dados geocronológicos e assinaturas geofísicas. A porção a norte do Lineamento Patos é subdividida nos sub-domínios Médio Coreaú, Ceará Central e Rio Grande do Norte, sendo a área do projeto de pesquisa inserida neste último (VAN SCHMUS et al., 1995; SANTOS, 1996).

## 2.2 DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE

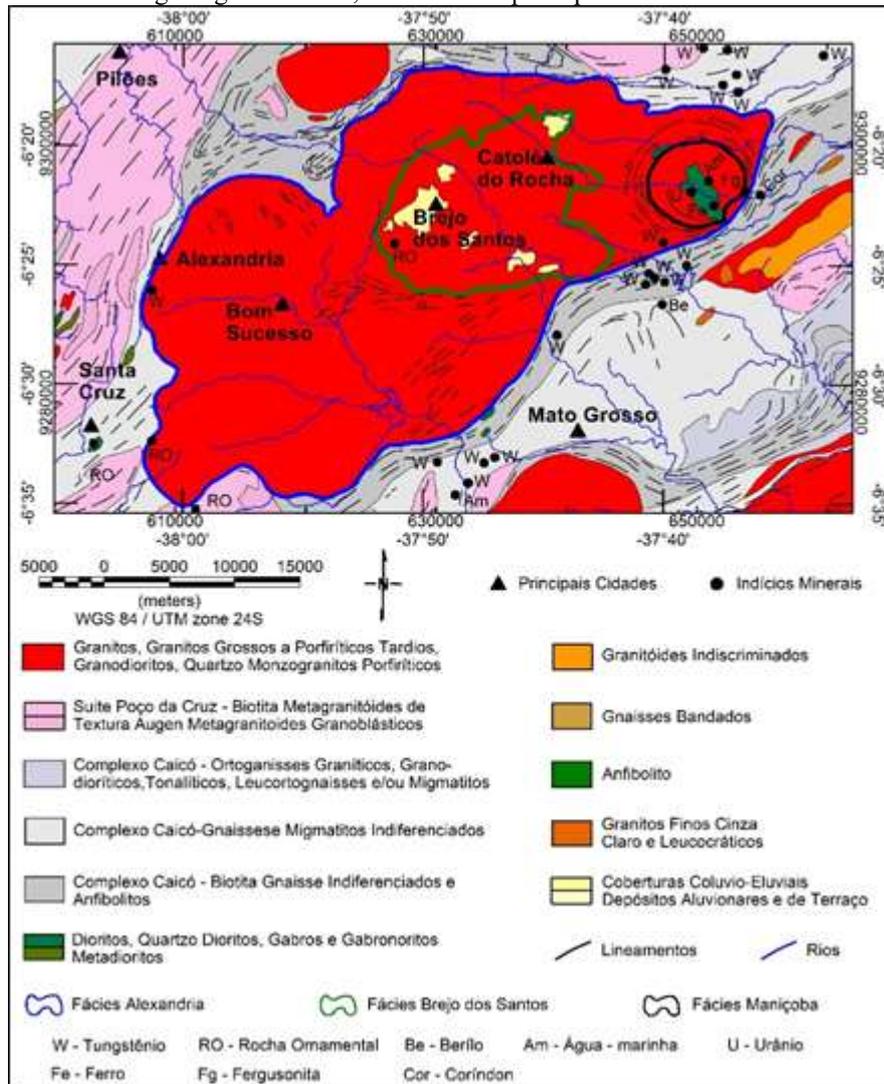
O Domínio Rio Grande do Norte é limitado a sul pela zona de cisalhamento Patos, a oeste pelo sistema Orós-Jaguaribe e a norte e leste por coberturas sedimentares mesozoicas-cenozoicas (MEDEIROS et al., 2008) (Figura 2). A região apresenta embasamento gnáissico-migmatítico de idades Arqueana – Paleoproterozoica e, em menor extensão, o Grupo Seridó e expressivas estruturas de idade Neoproterozoicas. Estas estruturas são representadas por zonas



### 2.3 ÁREA DA PESQUISA

O Batólito de Catolé do Rocha (Figura 3) é constituído por um corpo principal com mais de 700 km<sup>2</sup> de extensão, e por três corpos menores (*stocks*) próximos às cidades de Brejo do Cruz, Serra do Moleque e Serra da Boa Vista (MEDEIROS et al., 2008; FERREIRA; SANTOS, 2000). Estes granitóides estão intrudidos em rochas paleoproterozoicas do Complexo Caicó e Suíte Poço da Cruz do Domínio Rio Grande do Norte.

Figura 3 – Mapa geológico do Batólito de Catolé do Rocha, demonstrando a área de pesquisa, as principais unidades geológicas da área, as fácies e as principais ocorrências minerais.



Fonte: Adaptado de Medeiros et al. (2008).

A porção do Complexo Caicó contida na área de estudo (Figura 3) é constituída por ortognaisses, migmatitos e rochas metavulcanossedimentares diversas (JARDIM DE SÁ, 1994). A suíte Poço da Cruz é constituída por *augen*-gnaisses de composição quartzomonzonítica a monzogranítica e metadioritos (FERREIRA, 1998).

### 2.3.1 Batólito Catolé do Rocha

O Batólito de Catolé do Rocha aflora na porção oeste do Domínio Rio Grande do Norte, como um corpo aflorante, alongado na direção NE-SW, apresentando três fácies principais: Alexandria, Brejo dos Santos e Maniçoba (Figura 3) (MEDEIROS et al., 2008). Em menor proporção, ocorrem diques e bolsões de leuco-microgranitos cortando as fácies Alexandria e Brejo dos Santos, com texturas predominantemente finas e composições biotita sieno/monzograníticas. Dois corpos dioríticos na porção nordeste do batólito e internos à fácies Maniçoba ocorrem ainda na região (MEDEIROS, et al., 2008).

A Fácies Alexandria é a mais representativa do Batólito de Catolé do Rocha, constituindo toda a parte mais externa do corpo. Esta fácies apresenta anfibólio-biotita sienogranitos e monzogranitos com textura fanerítica, leucocrática, com a ocorrência de fenocristais de K-feldspatos de até 5 cm de comprimento. Exibe como minerais acessórios anfibólio, minerais opacos, titanita, zircão, epidoto e allanita (MEDEIROS, et al., 2008; MEDEIROS, 2008).

A Fácies Brejo dos Santos ocupa a parte central do batólito, representada por biotita-anfibólio sienogranitos a quartzo sienitos de textura grossa a porfírica, com a ocorrência de fenocristais com até 2,5 cm. Apresenta como acessórios minerais opacos, titanita, zircão, apatita e allanita (MEDEIROS, et al., 2008; MEDEIROS, 2008).

A Fácies Maniçoba está localizada na porção nordeste do batólito, apresentando forma aproximadamente circular, formada por biotita sienogranitos leucocráticos a holocráticos grossos. Exibe minerais opacos, zircão, apatita, titanita, allanita e epidoto secundário como acessórios. Em seus limites, conta com dois corpos de dioritos a quartzo-dioritos, gabros médios a grossos são raros. O corpo máfico maior apresenta forma aproximadamente circular e está localizado no interior da fácies Maniçoba. Já o corpo menor possui formato alongado e está localizado na parte externa da fácies Maniçoba, porém, próximo ao seu limite. Estes corpos dioríticos possuem paragênese mineral composta por clinopiroxênio, plagioclásio, titanita, anfibólio e biotita (MEDEIROS, et al., 2008; MEDEIROS, 2008; CAMPOS, et al., 2016).

### 2.3.2 Aspectos Geoquímicos do Batólito de Catolé do Rocha

Segundo Medeiros et al. (2008), o Batólito de Catolé do Rocha apresenta assinaturas geoquímicas que demonstram que suas litologias são de natureza orogênica, relacionadas a ambientes colisionais. Tais conclusões são tomadas em virtude tanto das assinaturas geoquímicas quanto de sua idade U-Pb em zircão de  $571 \pm 3$  Ma (MEDEIROS et al., 2005).

Dados litogeoquímicos das fácies e diques de leuco-microgranitos sugerem que estas rochas são co-magmáticas, com padrão de evolução gradativa da Fácies Brejo dos Santos, Fácies Alexandria, diques leuco-microgranitos e culminando na Fácies Maniçoba (MEDEIROS et al., 2008). A suíte máfica/intermediária não possui assinaturas que possam sugerir que seu magma parental tenha sido o mesmo dos granitos e dos microgranitos não seguindo o trend padrão evolutivo esperado (MEDEIROS et al., 2008; CAMPOS et al., 2016).

Conforme Medeiros et al. (2008), o processo evolutivo dominante das rochas félsicas foi o de cristalização fracionada em virtude de assinaturas meso e microtexturais, além da geoquímica de elementos traço. As principais fases em fracionamento precoce, obtidos a partir dos elementos maiores, foram os máficos, principalmente anfibólio, titanita e biotita, além de apatita e plagioclásio. A partir dos elementos traços, além dos máficos citados anteriormente, opacos/óxidos e zircão e ainda fracionamento tardio de K-feldspato (MEDEIROS et al., 2008).

Medeiros et al. (2008) argumentam que tanto as rochas da suíte máfica/intermediária quanto as rochas félsicas não apresentam associações típicas alcalina ou cálcio-alcalina mostrando caráter transicional entre estas duas séries. Esses autores sugerem ainda uma fonte mantélica como magma parental das rochas da suíte máfica-intermediária e crosta inferior para as rochas félsicas, sendo também possível uma contribuição subordinada mantélica em virtude de processos de mistura observados em campo.

### 3 MÉTODOS

Com a evolução tecnológica das duas últimas décadas, os métodos geofísicos passaram de fontes de análises qualitativas secundárias para fontes primárias na identificação e interpretação de novos depósitos minerais. Este processo foi impulsionado em virtude da crescente escassez de recursos minerais em superfície, levando a exploração de alvos a maiores profundidades e o aumento do custo agregado para extração. Nesse viés, a aplicação da geofísica é a ferramenta de melhor-custo benefício para a identificação de áreas com probabilidade de ocorrência mineral, além de evidenciar estruturas geológicas que possam abrigar mineralizações de interesse econômico (RIBEIRO; MANTOVANI, 2017), e auxiliar mapeamentos geológicos e estruturais (RIBEIRO et al., 2013).

Métodos geofísicos aerotransportados, principalmente magnetometria e gamaespectrometria, podem ser ressaltados como ideais para a caracterização de áreas pouco conhecidas como o Batólito de Catolé do Rocha. Tais métodos têm rápida cobertura, boa resolução e são não destrutivos. Podem ser utilizados tanto de forma qualitativa na geração de mapas litogeofísicos, de domínios magnéticos e interpretação de estruturas magnéticas, quanto de forma quantitativa através de caracterização tridimensional dos parâmetros físicos de anomalias (contraste de susceptibilidade magnética).

#### 3.1 GAMAESPECTROMETRIA

A gamaespectrometria é um dos métodos mais utilizados para auxílio em trabalhos geológicos.

##### 3.1.1 Teoria

A instabilidade dos núcleos de átomos radioativos em condições naturais causa a liberação de energia espontânea a partir da desintegração de seus núcleos. As radiações emitidas na desintegração podem ocorrer na forma de partículas carregadas alfa ( $\alpha$ ) e/ou beta ( $\beta$ ) ou como radiação gama ( $\gamma$ ), apresentando baixo poder de penetração em diferentes materiais (Figura 4A). A emissão alfa e beta causam estado de excitação na matéria e a energia em excesso é liberada na forma de energia como radiação gama (IAEA, 2003). Estas emissões causam:

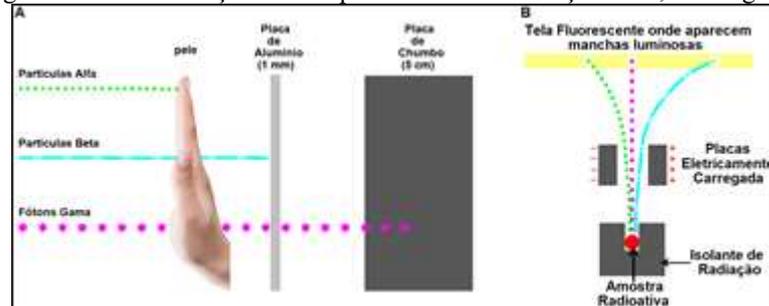
Emissão  $\alpha$  → Ejeção de 2 prótons e 2 nêutrons.

Emissão  $\beta$  → Ejeção de elétron ou pósitron em alta velocidade.

Emissão  $\gamma$  → Radiação eletromagnética de curtíssimo comprimento de onda.

A radiação gama não altera a direção de seu movimento quando transita imersa em campo magnético e possui o maior poder de penetração dentre as três radiações citadas (ALSOP; WATTS, 1997) (Figura 4B). A relação entre o decaimento e o tipo de radiação de cada radioisótopo e sua correlação constituem o princípio dos métodos radiométricos.

Figura 4 – Demonstração do comportamento das radiações alfa, beta e gama.



Nota: A – poder de penetração das partículas; B – comportamento das partículas quando imersas em um campo magnético qualquer.

Fonte: Adaptado de Peruzzo e Canto (2003).

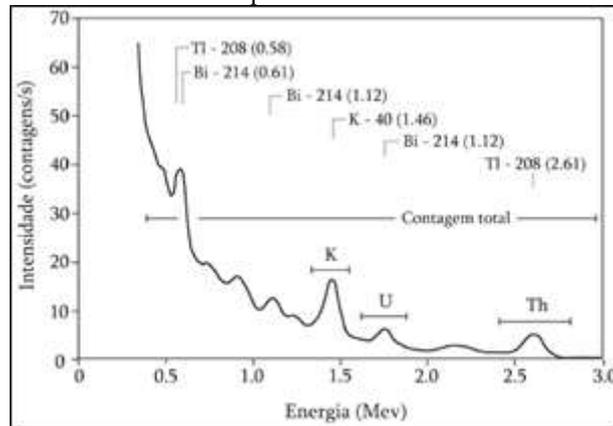
Na natureza existem mais de cinquenta isótopos radioativos diferentes, porém a maioria é rara ou possui energia radioativa fraca. Com isso as principais fontes de radiação gama observados na natureza são o potássio ( $^{40}\text{K}$ ), e elementos das séries do urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e do tório ( $^{232}\text{Th}$ ), os quais viabilizam a prospecção pelo método por suas concentrações mais elevadas na crosta superior (TELFORD et al., 1990).

São consideradas como as séries do urânio e do tório, pelo fato dos isótopos de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  não emitirem radiação  $\gamma$ . Em suas séries de decaimento, o  $^{214}\text{Bi}$  e o  $^{208}\text{Tl}$  emitem raios  $\gamma$ , sendo referenciados como eU (urânio equivalente) e eTh (tório equivalente), respectivamente, e serão tratados de maneira simplificada como U e Th, no decorrer do texto. Por suas concentrações médias na crosta, o K é expresso em %, e o eU e eTh em ppm (MINTY, 1997).

A aquisição da radiação gama é feita por espectrômetro, que registra uma faixa de energia que varia de 0,41 a 2,81 MeV onde os espectros dos radioelementos K, U e Th estão inseridos (Figura 5). A faixa de energia do potássio varia de 1,37 a 1,57 MeV com pico em 1,46 MeV. O urânio conta com faixa energética entre 1,66 a 1,86 MeV com máximo em 1,76 MeV, enquanto o tório apresenta energia que varia de 2,41 a 2,81 com máximo registrado em 2,61 MeV (IAEA, 1991).

Tanto as faixas energéticas dos três radioelementos quanto seus picos não se sobrepõem em nenhum momento, sendo possível a aquisição dos espectros de energia de U, Th e K e a posterior separação das faixas energéticas, sendo este o princípio da gamaespectrometria (MINTY, 1997).

Figura 5 – Espectro da radiação gama mostrando as faixas de energia de urânio, tório, potássio e a contagem total a qual estão inseridos.



Fonte: Adaptado de Foote (1968).

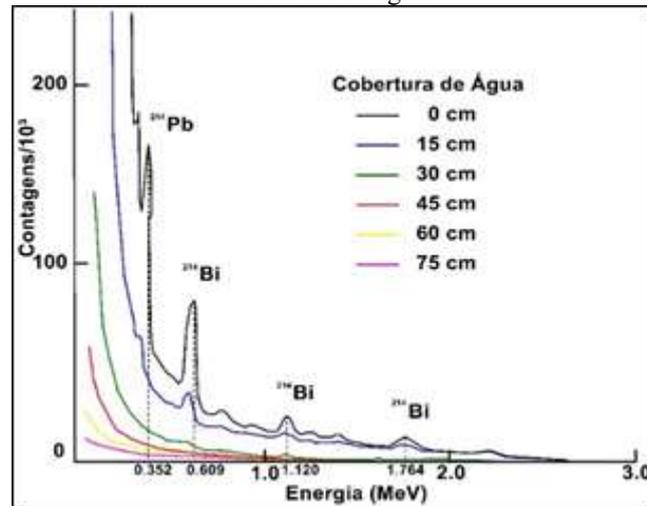
O método gamaespectrométrico apresenta pouca profundidade de penetração, chegando ao máximo em torno de 30 a 40 cm de profundidade em meios anidros. Essa baixa penetração se deve ao fato da interferência que o meio proporciona as medições, assim reduzindo a espessura média investigada (MINTY, 1988). Qualquer material entre a fonte de emissão gama e o receptor dissipa os raios  $\gamma$  segundo o inverso de sua densidade.

### 3.1.2 Interferências nas Medidas Aerogamaespectrométricas

Fatores ambientais atenuam as medidas radiométricas de forma significativa. Dentre os principais fatores responsáveis pela atenuação pode-se apontar a presença de cobertura de solo, capaz de atenuar até 95% da emissão gama com apenas 35 cm de espessura, causando a pequena profundidade de investigação observada do método radiométrico (MINTY, et al., 1997). Um regime de chuvas intenso também pode influenciar de maneira significativa a emissão  $\gamma$ , pois esta radiação é absorvida pela água (Figura 6), fator que controla os voos de prospecção geofísica após precipitações.

Voos de levantamentos devem ser cancelados em 3 horas após precipitações fracas, de 3 a 6 horas quando ocorrem precipitações moderadas e até 12 horas para precipitações torrenciais. Também deve ser considerada a diminuição da temperatura ocasionada pela precipitação que faz com que o radônio atmosférico, previamente disperso de forma aleatória em toda atmosfera, se acumule em regiões de vale, afetando as aquisições radiométricas, causando falseamento dos dados adquiridos.

Figura 6 – Variação do espectro de minério de urânio demonstrando a variação da contagem em função da cobertura de água.



Fonte: Adaptado de Dickson et al. (1979).

A vegetação é outro fator que pode interferir de maneira significativa na aquisição de U e Th e até 15 % da emissão de K. A umidade relativa do ar, presença de nuvens, variação da temperatura e pressão atmosféricas, interferem na aquisição por reterem água e aerossóis na atmosfera. Inversão térmica pode causar o falseamento nos dados adquiridos por conta da retenção de radônio e, por fim, deve-se levar em consideração efeitos direcionais, de quando as janelas de detecção gama não estão orientadas no plano de aquisição (GUNN, 1998).

Além dos fatores ambientais, características intrínsecas do levantamento podem afetar dados gamaespectrométricos. A distância entre o ponto de aquisição (sensor) e o ponto amostrado (superfície terrestre), que representa no aerolevanteamento a altura de voo, e a distância entre os pontos e espaçamento entre linhas de aquisição podem afetar as aquisições. Os volumes dos cristais de aquisição controlam o número de contagens sendo esse diretamente proporcional ao volume, ou seja, quando o volume for grande, mais contagens e quando for menor menos. A resolução dos cristais controla a qualidade dos dados adquiridos, e, portanto, quanto maior a resolução e volume dos cristais melhor será o resultado da aquisição radiométrica.

No levantamento foram utilizados três conjuntos de caixas de cristais em cada voo, geralmente compostos por iodeto de sódio ativado por tálio (NaI(Tl)). Dois conjuntos apresentam volume de 1024 (pol<sup>3</sup>) e outro conta com 512 pol<sup>3</sup>. As caixas de cristais com 1024 pol<sup>3</sup> contêm cinco cristais de aquisição cada, sendo quatro direcionadas para o solo, denominadas de *downward looking*, e uma direcionada para cima, denominada de *upward looking*, responsável pelo monitoramento do gás radônio atmosférico (<sup>222</sup>Rn). Já a caixa de cristais com 512 pol<sup>3</sup> contêm quatro cristais *downward looking*.

### 3.1.3 Comportamento Geoquímico do Urânio, Tório e Potássio

A interpretação de dados gamaespectrométricos possuem a contribuição da distribuição das concentrações de U, Th e K nos primeiros centímetros da superfície terrestre, bem como seus comportamentos geoquímicos no ambiente (ULBRICH et al., 2009). Estes fatores podem auxiliar em informações sobre a litologia de uma determinada região, restringir áreas de interesse de exploração mineral e/ou demarcar pontos de variação anômala para estudos detalhados.

O potássio (K) ocorre principalmente em feldspatos potássicos, com concentração variando de 12,45 a 13,28 %wt, e micas mais comuns variando de 6,64 %wt (biotita), passando por 8,13 %wt (flogopita) e chegando até 9,30 %wt (muscovita) (WILFORD et al., 1997). Devido ao seu raio iônico e mobilidade, o K é lixiviado facilmente dos minerais primários e posteriormente adsorvidos em argilominerais. Em condições de intemperismo, o K é solúvel e tem alta mobilidade principalmente em climas tropicais e subtropicais e em processos de alteração hidrotermal.

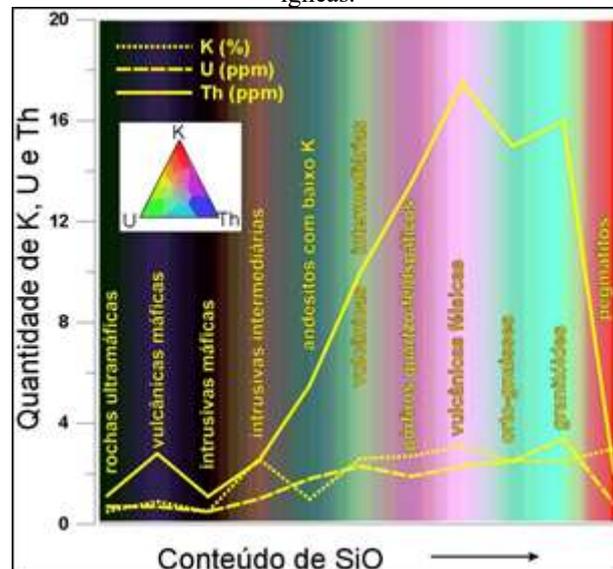
O urânio (U) e o tório (Th) ocorrem no ambiente de forma similar devido ao raio iônico de ambos, 0,95 Å e 0,98 Å, respectivamente. As abundâncias médias na parte superior da crosta são de aproximadamente 2,7 e 10,5 ppm, respectivamente (RUDNICK; GAO, 2003). A principal ocorrência do U e do Th se dá em rochas ígneas e metamórficas quartzo feldspáticas, ocorrendo principalmente em minerais acessórios como a monazita, xenotima, zircão, allanita, apatita, dentre outros. Também apresentam afinidade em altas temperaturas, ocorrendo em rochas ígneas ácidas e metamórficas quartzo feldspáticas e em depósitos minerais hidrotermais.

Diante de intemperismo, o U e Th se comportam de forma diferente do K, pois estão contidos nos minerais acessórios que são estáveis durante o intemperismo. Entretanto, o U é mais móvel que o Th e pode ser lixiviado devido ao seu estado de valência  $U^{+6}$ , sendo, portanto, mais solúvel. Já o Th possui valência  $Th^{+3}$  e  $Th^{+4}$ , porém a perspectiva de ocorrência da última é maior (BOYLE, 1982). Em ambientes de pH ácido, o Th pode também ser lixiviado devido a facilidade de formar solução neste ambiente.

Com o incremento de sílica em rochas ígneas, os teores de U, Th e K aumentam de forma considerável (Figura 7), ao passo que em rochas ígneas máficas ou ultramáficas a concentração desses elementos é mais baixa. O aumento de K em detrimento do U e Th em uma determinada região da intrusão granítica pode sugerir que esta é mais evoluída. Como exemplo podem ser citados os pegmatitos, que no geral são gerados a partir da segunda

ebulição da fase fluída em corpos félsicos durante a redução da temperatura (BIONDI, 2003). Esses corpos apresentam teores muito altos de K e menores de U e Th.

Figura 7 – Gráfico das concentrações dos radioelementos K, U, Th versus o incremento de sílica em rochas ígneas.



Fonte: Adaptado de Dickson e Scott (1997).

O K é o elemento mais afetado em processos de alteração hidrotermal, apresentando alta concentração na assembleia mineral de alteração. O Th, menos móvel, é pouco afetado, porém pode ser mobilizado e empobrecido em regiões de alteração hidrotermal potássica ou de intensa silicificação (DICKSON; SCOTT, 1997). Contrastes de K com Th e/ou U, também podem ser identificados em algumas regiões mineralizadas, caracterizado pelo antagonismo entre K e Th (OSTROVSKIY, 1975).

O comportamento de U e Th pode variar na evolução dos fluidos magmáticos, pois a composição do magma, pressão e conteúdo de água influenciam o comportamento do coeficiente de partição destes elementos, causando enriquecimento relativo em rochas graníticas. A cristalização fracionada em plútons podem exibir uma diminuição de K e Th do centro para a borda da intrusão devido à evolução do corpo ígneo (IAEA, 2003; DICKSON; SCOTT, 1997).

### 3.1.4 Correções Aerogamaespectrométricas

Dados aerogamaespectrométricos requerem uma série de correções iniciais, para que os espectros adquiridos possam ser analisados com relação a sua concentração na crosta. O tempo morto (*dead time*) é o tempo necessário para a célula fotomultiplicadora transformar as cintilações registradas em impulsos elétricos e o gamaespectrômetro registrar os dados. Enquanto o equipamento faz o registro, nenhuma outra cintilação que atinge a célula

fotomultiplicadora é registrada, causando diminuição nas contagens por segundo. Essa defasagem é corrigida calculando a divisão das contagens registradas nos canais adquiridos pelo valor do tempo total de medida (*live time*). Esse procedimento tende a normalizar os dados brutos nos canais de contagem total (CT), K, U, Th e Urânio *upward* (*Uup*) (IAEA, 2003).

Em regiões onde o terreno conta com variações acentuadas de altitude, nem sempre a aeronave consegue manter altitude de voo constante exigida. Por este motivo nos levantamentos aerogamaespectrométricos é referida a altura efetiva de voo. A correção é feita a partir de instrumentos instalados na aeronave. Radar altímetro, termômetro e barômetro, que indicam a altitude relativa da aeronave em relação ao solo, a temperatura e a altitude relativa à pressão atmosférica, respectivamente, e a partir desses dados é calculada a correção devido à altura efetiva de voo (MINTY, et al., 1997). Falsas anomalias podem ocorrer devido a uma topografia acidentada, pois os valores radiométricos são tomados em relação à altura nominal de voo. Para a correção altimétrica é aplicada uma fórmula que correlaciona a atenuação das radiações  $\gamma$  em relação ao distanciamento da fonte (IAEA, 1991).

Durante as aquisições, o *background* gerado pela fuselagem da aeronave influencia na aquisição como um valor constante. O *background* cósmico, por sua vez, é causado por radiação secundária oriunda da interação da radiação dos raios cósmicos com átomos e moléculas da atmosfera superior. Estas correções são feitas a partir de dados adquiridos em voos testes chamados de cósmicos, realizados sobre superfícies livres de fontes que emitem radiação. Geralmente esses voos são realizados sobre o mar e em diferentes altitudes (IAEA, 1991).

O gás radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) disperso na atmosfera representa uma fonte de ruído importante por ser um dos isótopos filhos do U e aparecer antes do  $^{214}\text{Bi}$  na série de decaimento. Este ruído pode influenciar as medidas de forma considerável, representando até 50% no valor da medida em casos extremos. A correção é feita a partir dos dados adquiridos pelos cristais *upward looking* (*Uup*). Os dados registrados por esse sistema são usados para estimar os coeficientes chamados *skyshine* a partir da correlação entre o *Uup*, com as medidas de U e Th de superfície (IAEA, 2003).

O espalhamento Compton pode comprometer a qualidade dos dados gamaespectrométricos devido à diminuição de energia do fóton pelo ângulo de sua incidência na célula fotomultiplicadora. Com o decréscimo de energia causado pela distância até a superfície, o Th (2,61 MeV) pode ser registrado na janela de aquisição do U (1,66 a 1,86 MeV) o mesmo pode ocorrer com o U na janela do K. Com a utilização de fontes controladas

de U, Th e K (*pads*), de concentrações e energia conhecidas, a calibração do sistema é feita e são estimados os coeficientes de *stripping* usados na determinação da taxa líquida de contagem dos elementos em cada janela (DARNLEY, 1993; GRASTY et al., 1991).

Após as correções, os canais brutos de eU, eTh e K são convertidos para contagens por segundo (cps), demonstrando a variação de concentração dos elementos sobre a superfície. A correção utiliza os canais de eU, eTh e K e coeficientes de sensibilidade, para calcular o canal com Th e U em ppm e o canal de K em %. Os coeficientes de sensibilidade são obtidos a partir de teste de aquisição realizado tanto por medidas do sistema aéreo quanto de um sistema terrestre efetuadas no mesmo local e com a mesma fonte. Os coeficientes são dependentes dos fatores geométricos da aquisição, tipo de fonte utilizada e atenuação com a altura de aquisição (MINTY, 1997).

### 3.1.5 Técnicas Utilizadas na Interpretação Gamaespectrométrica

A partir dos dados radiométricos corrigidos é possível obter informações com mapas de U, Th e K que, em conjunto com o conhecimento geológico e estrutural da área de interesse, pode ser uma importante ferramenta nos mais variados estudos de Ciências da Terra. A partir das contagens individuais, mapas de razões radiométricas de U/Th, U/K e Th/K são confeccionados. Estas podem auxiliar no diagnóstico de mudanças do tipo de rocha, alteração hidrotermal, geomorfologia, variações da concentração do radioelemento dentro de corpos ígneos. Tipos de rochas em uma mesma região podem apresentar distinção entre a concentração de U, Th e K, sendo que suas razões podem indicar os limites dessas concentrações.

Alterações hidrotermais, principalmente potássica e fílica (outras podem ocorrer como halo gradacional e distal de uma alteração potássica), podem apresentar maiores concentrações de K na região de ocorrência da alteração. O hidrotermalismo pode facilitar a ocorrência de metais base como cobre (Cu), chumbo (Pb), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e/ou ouro (Au), prata (Ag), evidenciados por razões U/K e Th/K.

A geomorfologia pode ser correlacionada às razões radiométricas, pois regiões topograficamente mais elevadas têm a tendência de concentrar U e Th e o K ser remobilizado (IZA et al., 2018; WILFORD et al., 1997). Tal fator propicia o contraste das razões de U/K e Th/K e menor das de U/Th, podendo auxiliar na individualização de coberturas sedimentares indiferenciadas (IZA et al., 2018).

Corpos ígneos, principalmente granitóides, podem ser mapeados quanto as concentrações dos radioelementos, pois o processo de enriquecimento destes dentro do corpo

ocorre com a diferenciação magmática, cristalização fracionada e alteração hidrotermal, sendo o corpo ígneo mais evoluído com concentrações maiores de K em relação as de Th e U, e menos evoluídos com alto de U, Th e K. A diferença nas razões de U/K e Th/K é mais representativa que a razão U/Th, já que durante a gênese e evolução do corpo granítico o comportamento geoquímico não é uniforme.

O parâmetro F (OSTROVSKIY, 1975; GNOJEK; PRICHYSTAL, 1985) normaliza os radioelementos U e K pelo Th, realçando as contribuições dos dois primeiros em detrimento do último. Esta técnica é aplicada para determinar áreas que possuam ocorrência de alteração hidrotermal. Valores altos desse fator podem indicar enriquecimento de U e K, enquanto valores baixos podem indicar lixiviação ou intemperismo, principalmente do potássio.

A técnica do potássio anômalo (K anômalo) pode auxiliar o reconhecimento de alteração hidrotermal com expressão em superfície (PIRES, 1995). A técnica visa identificar acumulações anômalas de K, através da identificação da correspondência entre as concentrações de K e de Th. O U, o Th e o K podem ter suas mobilidades afetadas por efeitos ambientais, pedogenéticos e geoquímicos.

A utilização do Th como controle litológico pode reduzir estes efeitos, já que é elemento menos móvel, possibilitando a identificação de valores ideais para a concentração de K (DICKSON; SCOTT, 1997; WILFORD et al., 1997; SAUNDERS et al., 1987). Este procedimento pode ser efetuado da mesma forma para o U, obtendo o urânio anômalo (U anômalo), substituindo as concentrações de K pelas concentrações de U. Porém os resultados obtidos para o U anômalo são menos expressivos que os encontrados para o K anômalo. Uma vez que o U anômalo é avaliado pela correspondência com o Th e o comportamento geoquímico de ambos são similares (PIRES, 1995).

O mapa de visualização ternária é utilizado na distinção de unidades geológicas, no auxílio ao mapeamento geológico de detalhe e no mapeamento estrutural quando as estruturas da área são aflorantes, entre outros. Um exemplo desta característica são os grandes cisalhamentos da Província Borborema, presentes em todas as visualizações ternárias. Esta técnica permite evidenciar a distribuição dos radioelementos U, Th e K de forma conjunta. A coloração branca representa alta contagem dos três radioelementos (rochas félsicas), variando conforme a concentração de cada radioelemento até ao escuro/preto para baixos de U, Th e K (rochas máficas e ultramáficas). Conjuntamente com esses dados se faz necessária a análise do mapa do modelo digital de terreno (MDT), pela associação da topografia com efeitos intempéricos e erosivos.

## 3.2 MAGNETOMETRIA

A magnetometria é uma das técnicas mais utilizadas no mapeamento geofísicos regional e pode auxiliar na avaliação estrutural e na identificação de estruturas magnéticas.

### 3.2.1 Teoria

A magnetometria é o método geofísico que estuda a interação do campo geomagnético com as rochas da crosta terrestre. Essa interação magnética, chamada indução, tende a ser variável conforme as propriedades físicas das rochas a qual interagiu e pode ser representada segundo a equação:

$$\vec{M}_I = \chi \vec{H} \quad (1)$$

onde  $\vec{M}_I$  representa a magnetização induzida,  $\chi$  é a susceptibilidade magnética e  $\vec{H}$  é o campo magnético. A magnetização induzida é proporcional ao campo magnético e paralela a sua direção.  $\chi$  é o parâmetro físico que demonstra a facilidade com que o material pode ser magnetizado (LOWRIE, 2007).

A magnetização de um sólido qualquer é controlada pelo momento magnético oriundo de seus átomos e/ou íons contidos na estrutura e proporcionais ao momento angular associado ao movimento orbital dos elétrons ao redor do núcleo, com os spins ao redor de sua órbita de rotação. O momento magnético líquido surge quando as orbitas dos núcleos atômicos não estão preenchidas completamente e contém órbitas desiguais, pois, os átomos e/ou íons ocupam posições fixas em uma rede regular, demonstrando a simetria da estrutura cristalina do material e controlando a interação entre os íons.

Existem três comportamentos distintos dentro dos estudos de susceptibilidade magnética, os materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Em materiais diamagnéticos imersos em campo externo, a magnetização se desenvolve em sentido contrário ao campo indutor e é caracterizada por susceptibilidades baixas e negativas. Quando o campo externo é retirado, o momento magnético líquido é nulo. Em materiais paramagnéticos inseridos em campo magnético, a magnetização assume a mesma direção do campo indutor e possui susceptibilidades baixas e positivas. Quando o campo magnético externo é retirado, o momento magnético nestes materiais é nulo.

O ferromagnetismo é caracterizado por possuir susceptibilidades magnéticas elevadas e é um fenômeno observado em metais como cobalto, níquel e ferro. É caracterizado pela troca de elétrons entre átomos vizinhos, por possuir geometria e espaçamento na rede cristalina. Essa característica reforça o alinhamento mútuo em uma direção comum, gerando

momento magnético líquido positivo e de mesma orientação do campo indutor. O ferromagnetismo pode ainda ser subdividido em antiferromagnetismo, ferrimagnetismo parasita e ferrimagnetismo.

Os materiais ferromagnéticos podem manter o momento magnético mesmo se retirados da influência do campo magnético externo, gerando a magnetização remanente ( $\vec{M}_r$ ). Esta magnetização, diferente da induzida, é adquirida conforme sua formação ou devido a processos geológicos pelos quais a rocha passou durante sua história evolutiva. Ela pode apresentar qualquer direção, dependendo somente da direção do campo geomagnético no momento de sua formação, o que torna a interpretação de anomalias que contenham  $\vec{M}_r$  complexas devido a sua característica vetorial. O processamento dos dados é dificultado em casos de remanência, pois a maior parte das técnicas de realce são formuladas assumindo somente a existência da  $\vec{M}_I$ . Algoritmos de modelagem apresentam as mesmas complicações. A remanência está diretamente ligada ao tamanho dos minerais ferromagnéticos *single domain*, *pseudo single domain* ou *multi domain*. São representados principalmente por ferro, níquel, cobalto e qualquer liga que inclua pelo menos um destes elementos.

A interpretação da magnetização total de um corpo, caracterizada por sua forma, direção e polaridade, depende diretamente de seus parâmetros físicos e geometria. Sendo a magnetização total de um corpo  $\vec{M}_T$  a somatória dos momentos magnéticos ( $\vec{m}_i$ ) em função de seu volume ( $V$ ) (BLAKELY, 1996), e são expressas por:

$$\vec{M}_T = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i \quad (2)$$

Quando os dados magnéticos são adquiridos, eles não contam só com a magnetização induzida pelo campo magnético terrestre, mas também com a magnetização remanente. Ambos são componentes vetoriais tridimensionais e o campo adquirido é resultado da soma vetorial de ambos. Essas componentes podem ser decompostas em componente vertical (inclinação magnética) e horizontal (declinação magnética), variando, conforme Blakely (1996),  $\pm 90^\circ$  e  $\pm 180^\circ$ , respectivamente, e são expressas pela relação:

$$\vec{M}_T = \vec{M}_I + \vec{M}_R \quad (3)$$

A relação entre as magnetizações induzida e remanente é um dos fatores mais importantes nos levantamentos magnetométricos, influenciando na forma e intensidade da

anomalia magnética e, por consequência, em sua interpretação. Essa relação é chamada de Razão de Königsberg ( $Q$ ). O resultado dessa razão é um número adimensional que quanto maior for, maior será a influência da  $\vec{M}_r$  nos dados adquiridos:

$$Q = \frac{\vec{M}_R}{\vec{M}_I} \quad (4)$$

Para o método magnético, o campo externo é representado pelo campo magnético da Terra (CMT), que por sua vez tem componente principal (80 a 90%) gerado pela convecção do núcleo externo líquido (CAMPBELL, 2003). A interação do CMT com as rochas da crosta terrestre é responsável pela criação de campos magnéticos secundários, que perturbam o campo local. Essa perturbação é chamada de anomalia magnética.

As anomalias magnéticas são alvos principais de pesquisas tanto de regiões superficiais quanto profundas (até a isoterma de Curie). A isoterma de Curie é limite termal máximo em que materiais ainda apresentam qualquer tipo de magnetização conservada, localizada em média em aproximadamente 580 °C (FROST; SHIVE, 1986; LOWRIE, 2007). Acima desta superfície é possível extrair importantes informações da crosta, permitindo entendimento de suas características físicas e geodinâmicas, auxiliando sua interpretação geológica e tectônica.

### 3.2.2 Correções aeromagnéticas

Para a obtenção das anomalias magnéticas e suas interpretações é necessário a aplicação de rotinas de correção nas informações adquiridas em aerolevantamentos. Levantamentos magnéticos são influenciados pelo CMT e o processamento visa isolar a resposta magnética devida apenas as rochas causadoras da perturbação. Na etapa de pré-processamento são efetuadas a análise da qualidade dos dados, verificação das coordenadas e remoção de *spikes* (picos sem correlação com os dados magnéticos).

O procedimento mais importante desta etapa é a eliminação dos efeitos elétricos/eletrônicos da aeronave nos dados, chamada de compensação magnética dinâmica. Este procedimento é feito através do voo de manobras a 10 mil pés (*pitch*, *roll* e *yaw*) nas orientações das linhas de voo e em região com gradiente magnético suave. Os dados adquiridos com as manobras são utilizados para determinar um conjunto de coeficientes de compensação do sistema e posteriormente aplicados em todas as linhas adquiridas. Na série de manobras da aeronave, os valores somados de cada manobra não podem exceder 1 nT, demonstrando a acurácia do aerolevantamento.

Após a compensação do sistema, é corrigida a diferença de tempo entre a medida do magnetômetro e o sistema de posicionamento global (GPS) da aeronave, denominada de correção de paralaxe ou *lag*. Essa correção é feita a partir da seleção de uma linha de voo que intercepta uma anomalia magnética de grande amplitude, dentro do bloco levantado. Após sua identificação são efetuados voos sucessivos em sentidos opostos na mesma linha de voo sobre a anomalia contando com parâmetros de aquisição mais próximos possíveis (altura e velocidade de voo). A diferença do valor de tempo encontrado é então aplicada para todas as linhas do aerolevantamento, tornando assim as feições coincidentes em qualquer direção que as linhas forem voadas.

A interação entre ventos solares e o CMT provoca distorções no segundo, produzindo variações que podem ter duração de horas. Em alguns casos a distorção pode ocorrer em minutos e apresentar forte influência nos dados. Este comportamento anômalo do CMT é devido a tempestades solares, e impedem a aquisição de dados confiáveis quando ocorrem. A correção da variação diária natural do CMT é feita a partir da instalação de um magnetômetro base em região livre de interferências e em raio de até 200 km dentro da área de onde estão ocorrendo os voos. Os valores obtidos pelo magnetômetro base são então removidos dos dados adquiridos pela aeronave, sendo esta correção denominada de remoção da variação magnética diurna.

Com a remoção da variação magnética diurna, alguns erros residuais podem ocorrer, causando super/subcompensação dos dados magnéticos. Para remoção de tais erros, são utilizadas as linhas de controle de direção perpendicular às linhas de voo. A partir delas são obtidas médias das diferenças em linhas contíguas. As diferenças obtidas são consideradas de primeira ordem e sua distribuição ocorre de forma aleatória por todo o banco de dados, representando disparidade entre linhas de voo e de controle. Esse procedimento é conhecido como nivelamento dos perfis.

Após o nivelamento ainda restam pequenas imperfeições e ruídos de curto comprimento de onda. Para eliminação é aplicado o procedimento denominado micronivelamento. O micronivelamento pode ser realizado utilizando o *butterworth* passa baixa, com comprimentos de onda proporcionais aos espaçamentos das linhas, e cosseno direcional na direção das linhas de voo. Estes procedimentos são estritamente matemáticos e visam a eliminação desses erros ao longo das linhas de voo.

Os dados magnetométricos contém além da resposta das rochas crustais a componente nuclear do campo magnético. Esta componente é relevante em levantamentos de grande escala (por exemplo, aerolevantamentos), pois apresenta variações regionais em função da

latitude. Para levantamentos locais (como levantamentos terrestres) esta correção não é obrigatória. Para efetuar essa correção é removido o *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) dos dados magnéticos. O IGRF é um modelo matemático calculado para o CMT baseado em informações de observatórios magnéticos distribuídos ao redor do mundo e por dados magnéticos de satélite. Esse modelo fornece estimativas da variação do campo geomagnético em função da posição no globo terrestre e do tempo. Como a variação do IGRF é muito pequena, o modelo é calculado e divulgado a cada cinco anos e deve ser utilizado na correção de dados magnéticos aerolevantados.

### 3.2.3 Técnicas Utilizadas na Interpretação Magnetométrica

O processamento dos dados magnéticos visa realçar certos comprimentos de onda em detrimento de outros, evidenciando da melhor forma as anomalias magnéticas que se deseja interpretar. O Campo Magnético Anômalo (CMA) representa influências da heterogeneidade magnética da região de pesquisa. Ele é composto pela superposição de diversas fontes magnéticas oriundas de diferentes profundidades. Havendo necessidade é possível remover a influência das fontes profundas para as anomalias mais superficiais serem realçadas, processo conhecido como separação regional-residual. Vários métodos são capazes de fazer a separação regional-residual dos dados do CMA como continuação para cima (*upward continuation*) (Eq. 5 a 8), espectro de potência, polinomial, dentre outras.

A técnica aplicada para este projeto de pesquisa foi a continuação para cima, adaptada de filtros físicos de passa-baixa frequência (*low-pass filters*) para o domínio do espaço. A aplicação dessa técnica tende a manter as anomalias de longo comprimento de onda e eliminar as de curto comprimento em função da simulação do campo geomagnético a certa altura obtendo o campo magnético regional (CR). Após a análise das altitudes da continuação para cima o procedimento de obtenção do campo magnético residual (CMR) é efetivado (Eq. 9). As fórmulas para o cálculo de continuação para cima e do campo magnético residual são:

$$T(x, y, z) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \tilde{T}_0(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} e^{k_z z} \quad (5)$$

$$k_x = \frac{2\pi n \Delta x}{N-1} \quad n=0, 1, 2, \dots, (N-1)/2 \quad (6)$$

$$k_y = \frac{2\pi m \Delta x}{M-1} \quad m=0, 1, 2, \dots, (M-1)/2 \quad (7)$$

$$k_z^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (8)$$

$$CMR = CMA - CR \quad (9)$$

onde  $T(x, y, z)$  é o campo magnético calculado para uma determinada altura  $z$ ,  $\tilde{T}_0$  são os coeficientes de Fourier para a altitude do local de levantamento,  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  são os números de onda e  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são os espaçamentos das coordenadas ao longo da malha de dados.

Com a obtenção do CMR é possível estimar os limites laterais dos corpos intrusivos através de filtros de gradientes do sinal que realçam as informações originais, facilitando a visualização das anomalias e contraste das propriedades físicas nas unidades geológicas investigadas. Os principais filtros utilizados foram a amplitude do gradiente total (TGA) (ROEST et al., 1992), a inclinação da fase do sinal analítico (ISA) (MILLER; SINGH, 1994), redução ao polo (RTP) (BARANOV, 1957), Deconvolução de Euler (THOMPSON, 1982), e o *Dynamic Range Compression* (DRC) (KOVESI, 2012).

A TGA (Eq. 10) tende a centrar um sinal positivo sobre o corpo magnético causador da anomalia magnética (ROEST et al., 1992). Esta técnica de realce depende fracamente da direção da magnetização do corpo anômalo. Entretanto este fator pode acarretar o deslocamento das amplitudes máximas resultantes, podendo não estar centrado sobre o topo do corpo causador da anomalia magnética (LI, 2006). Trata-se de uma técnica eficaz para identificar os limites laterais dos corpos geológicos magnéticos, com grande efetividade em baixas latitudes magnéticas.

$$TGA = \sqrt{\left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}\right)^2} \quad (10)$$

A ISA, também chamada de *Tilt Angle* (MILLER; SINGH, 1994) (Eq. 11), permite mapear lineamentos magnéticos através do contraste local da magnetização. Diferentemente de outras técnicas como o TGA, que realçam fontes rasas em detrimento de fontes mais profundas, a ISA tende a eliminar essa problemática. Sua aplicação propõe modular contribuições profundas e rasas em virtude da razão da derivada vertical com o gradiente horizontal total. Onde, para fontes profundas, os gradientes tendem a ser menores, porém a proporção matemática obtida será alta, demonstrando assim que a técnica pode ser utilizada tanto para fontes rasas e profundas quanto para fontes interferentes.

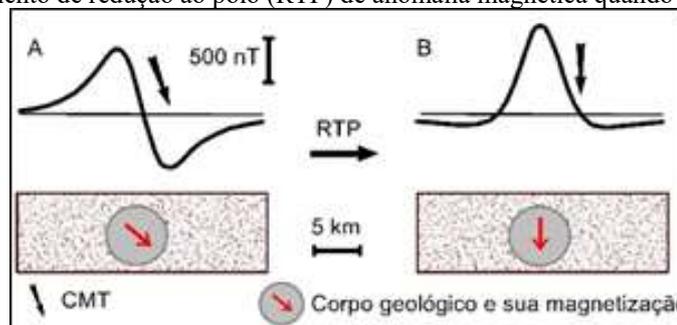
$$ISA(x, y, z) = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (11)$$

A RTP (Eq. 12) visa simular o comportamento da anomalia se inserida em um campo externo vertical. Idealmente esta técnica deve centralizar as máximas amplitudes de uma anomalia magnética sobre o centro de sua fonte causadora (BARANOV, 1957). Devido às características vetoriais do campo magnético, fora das regiões onde o CMT é vertical (polos magnéticos), as anomalias magnéticas apresentam um comportamento dipolar (BLAKELY, 1996) (Figura 8). Dessa forma a RTP facilita a interpretação, pois o formato da anomalia magnética representa as características do vetor de magnetização associado a fonte e o filtro de RTP ajusta a anomalia como se ela tivesse direção vertical. A fórmula original da RTP foi adaptada por Grant e Dodds (1972) de maneira a incluir o parâmetro de correção de amplitude e é dada por:

$$RTP(\theta) = \frac{[\text{sen}(I) - i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}{[\text{sen}^2(Ia) + \cos^2(Ia) \cos^2(D - \theta)][\text{sen}^2(I) + \cos^2(I) \cos^2(D - \theta)]} \quad (12)$$

onde  $\theta$  é a componente polar no domínio do número de onda,  $I$  é a inclinação magnética,  $D$  é a declinação magnética,  $Ia$  é a inclinação da correção de amplitude ( $Ia < |I|$ ).

Figura 8 – Procedimento de redução ao polo (RTP) de anomalia magnética quando o CMT não é vertical.



Nota: A – anomalia magnética em região onde o campo não é vertical e fonte causadora da anomalia; B – a mesma anomalia magnética após passar pela técnica de RTP.

Fonte: Adaptado de Blakely (1996).

A formulação da RTP assume o pré-conhecimento das magnetizações induzida e total, gerando resultados incoerentes quando usada com direções de inclinação e declinação incorretos (e.g. casos com magnetização remanente desconhecida). Para baixas latitudes o denominador da Eq. 12 tende a zero fazendo o resultado da RTP ser uma indeterminação matemática, o que faz com que essa técnica seja instável para baixas latitudes.

Uma alternativa para a aplicação do algoritmo de redução ao polo foi desenvolvida por Fedi et al. (1994) e implementada por Cordani e Shukowsky (2009). Esse algoritmo realiza um processo de inversão paramétrica buscando a inclinação e declinação totais que reduzem a

anomalia magnética adequadamente, com a anomalia predominantemente positiva centrada dentro dos limites do corpo fonte.

A estimativa das profundidades foi realizada a partir da Deconvolução de Euler (Eq. 13) (THOMPSON, 1982). Uma vantagem deste método é que ele tem fraca dependência da direção de magnetização do CMT, podendo ser aplicado para qualquer latitude e longitude (HINZE et al., 2013).

Como resultado, o método indica a profundidade ao topo das fontes das anomalias potenciais e suas coordenadas. O índice estrutural informado pelo usuário está associado à geometria aproximada da fonte geradora da anomalia magnética.

$$\frac{\partial T(x-x_0)}{\partial x} + \frac{\partial T(y-y_0)}{\partial y} + \frac{\partial T(z-z_0)}{\partial z} = N(T - B) \quad (13)$$

onde  $T(x, y, z)$  é o campo magnético observado,  $T(x_0, y_0, z_0)$  é a posição da fonte magnética,  $B$  o campo magnético regional e  $N$  é o índice estrutural indicado pelo usuário definido com base na geometria da fonte (Tabela 1). Nessa equação as únicas variáveis desconhecidas são  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  e  $B$  que podem ser obtidas a partir de mais de quatro observações de campo pelo método de mínimos quadrados, onde, na prática, no mínimo são utilizadas sete observações na janela da deconvolução de *Euler* para gerar o resultado matemático com maior precisão.

Tabela 1 – Índices estruturais e as principais geometrias das fontes dos sinais magnéticos.

Modelo geológico	Índice estrutural magnético (N)
Esfera	3
Pipe	2
Cilindro horizontal	2
Dique	1
Sill	1
Contato	0

Fonte: Adaptado de Reid et al. (1990).

Para a utilização desta técnica, sem o conhecimento prévio do índice estrutural ( $N$ ) utilizou-se a técnica desenvolvida por Florio et al. (2014). Esta técnica define o índice estrutural a partir da aplicação da deconvolução de Euler localizada em continuações para cima sucessivas sobre a anomalia. Com o aumento da altura do filtro o campo magnético passa a ter, progressivamente, comportamento mais dipolar, sofrendo cada vez menos interferência de fontes rasas que não representam o corpo magnético. Este afastamento da fonte faz com que o índice estrutural estabilize e se aproxime do seu valor real, e pode ser obtido através da plotagem do gráfico de continuação para cima *versus* o índice estrutural médios obtidos pela Deconvolução de Euler localizada.

Como técnica qualitativa de avaliação de profundidades foi aplicado o *Dynamic Range Compression* (DRC) (Eq. 14) (KOVESI, 2012). Sua utilização possibilita revelar características sutis da malha de dados interpolada com relação à variação de comprimentos de onda dos sinais amostrados sem, no entanto, causar distorções. Esta técnica não precisa de segmentações ou decomposições dentro da imagem, somente visa controlar os comprimentos de onda que se deseja destacar. Assim, é possível gerar uma sequência de imagens com vários comprimentos de onda que fazem parte da malha de dados interpolada original, ressaltando características tanto de longos quanto de curtos comprimentos de onda.

$$T(x, y) = \log(A(x, y) + 1) \cdot \text{sen}(\phi(x, y)) \quad (14)$$

onde  $T(x, y)$  é a reconstrução do sinal que se deseja,  $A(x, y)$  é a amplitude local e  $\phi(x, y)$  é a fase local.

O DRC permite interpretar as imagens de acordo com amplitudes destacadas sendo possível correlacionar qualitativamente as imagens com relação a profundidade das fontes das anomalias magnéticas. Inicialmente é utilizado um filtro passa alta nos dados controlando a escala de análise desejada, então é calculado o gradiente horizontal total para obter a fase local e a amplitude em cada ponto da imagem. Em seguida a amplitude é atenuada pela aplicação do logaritmo e reconstruída usando os valores da fase local original, podendo ressaltar comprimentos de onda desejados.

Outra técnica utilizada para avaliação da área de estudo foi o índice máfico (*IM*) (PIRES; MORAES, 2006), que integra os métodos magnéticos e radiométrico (Eq. 15).

$$IM = \frac{TGA}{(U*Th*K)} \quad (15)$$

A técnica visa à delimitação de domínios de alto ou baixo contraste de magnetização, sem a influência de porções superficiais a qual pode conter solo residual rico em ferro, possibilitando a separação de regiões de rochas félsicas e máficas de grandes áreas (IZA et al., 2018).

### 3.3 INVERSÃO DOS DADOS MAGNÉTICOS

A caracterização 3D das propriedades físicas do corpo anômalo pode fornecer importantes informações de seus atributos como forma, volume, profundidade e distribuição do contraste de susceptibilidade magnética. Pode ainda indicar depósitos minerais havendo

contraste de susceptibilidade (Tabela 2) e/ou magnetização dentro de um contexto geológico adequado.

Tabela 2 – Susceptibilidades magnéticas dos principais tipos de rochas da crosta terrestre.

Susceptibilidade ( $\times 10^6$ ) SI			Susceptibilidade ( $\times 10^6$ ) SI			Susceptibilidade ( $\times 10^6$ ) SI		
Tipo de Rocha	Variação	Média	Tipo de Rocha	Variação	Média	Tipo de Rocha	Variação	Média
<b>SEDIMENTARES</b>			<b>METAMORFICAS</b>			<b>IGNEAS</b>		
Dolomita	0 - 0.9	0.1	Amfibolito	-	0.7	Granito	0 - 50	2.5
Calcário	0 - 3	0.3	Xisto	0.3 - 3	1.4	Basalto	0.2 - 35	-
Areia	0 - 20	0.4	Filito	-	1.5	Diorito	1 - 35	17
Argila	0.01 - 15	0.6	Gneise	0.1 - 25	-	Andesito	10 - 40	-
45 Rochas Sedimentares	0 - 15	0.9	Quartzito	-	4	Olitico Diabásio	-	15
			Serpentinizado	3 - 17	-	Diorito	1 - 160	55
			Ardozia	0 - 35	6	Porfiro	0.3 - 200	60
			61 Rochas Metamórficas	0 - 70	4.2	Gabro	1 - 90	70
						Basalto	0.2 - 175	70
						Diorito	0.6 - 120	85
						Firrosseno	-	115
						Peridotito	90 - 120	150
						Andesito	-	160
						Média Igneas Ácidas	0 - 80	8
						Média Igneas Básicas	0.5 - 97	15

Fonte: Adaptado de Telford et al. (1990).

A inversão de dados magnéticos busca obter o contraste de susceptibilidade magnética a partir dos dados observados, minimizando o resíduo entre o Campo Magnético Preditado na Inversão (CMPI) e o Campo Magnético Residual (CMR). A inversão de dados magnéticos discretiza um vetor de dados  $\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T$  e um vetor de susceptibilidades das células do modelo  $\vec{\kappa} (\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n)$  relacionados pela matriz de sensibilidade  $G$ , tal que:

$$\vec{d} = G_{ij}\vec{\kappa} \quad (16)$$

em que os termos  $G_{ij}$  são a contribuição gerada pelo  $i$ -ésimo termo devido a susceptibilidade na  $j$ -ésima célula atribuída pelo usuário. O modelo gerado a partir da inversão é considerado satisfatório quando a função objetivo global ( $\Phi$ ) é minimizada.

$$\min \Phi = \Phi_d + \beta \Phi_m \quad (17)$$

onde  $\min \Phi$  é a função objetivo minimizada,  $\Phi_d$  o resíduo do ajuste,  $\beta$  é uma constante de balanceamento que controla a suavização do modelo através de  $\Phi_d$ .  $\beta$  define a importância relativa de cada uma das funções de  $\Phi_m$ , sendo  $\Phi_m$  a função objetivo do modelo (LELIÈVRE et al., 2006).

O resíduo do ajuste é dado por:

$$\Phi_d = \|W_d(G_{ij}\vec{\kappa}) - \vec{d}\|^2 \quad (18)$$

onde  $\vec{d}$  é o vetor de dados magnéticos adquiridos no levantamento e  $W_d$  a matriz diagonal onde o  $i$ -ésimo termo é caracterizado pelo inverso do desvio padrão ( $1/\sigma_i$ ) gerado no modelo.

A função objetivo do modelo é dada por (LELIÈVRE et al., 2006):

$$\begin{aligned} \Phi_m(\kappa) = & \alpha_s \int_V w_s \{w(\mathbf{r})[\kappa(\mathbf{r}) - \kappa_0]\}^2 dv + \alpha_x \int_V w_x \left\{ \frac{\partial w(\mathbf{r})[\kappa(\mathbf{r}) - \kappa_0]}{\partial x} \right\}^2 dv + \\ & \alpha_y \int_V w_y \left\{ \frac{\partial w(\mathbf{r})[\kappa(\mathbf{r}) - \kappa_0]}{\partial y} \right\}^2 dv + \alpha_z \int_V w_z \left\{ \frac{\partial w(\mathbf{r})[\kappa(\mathbf{r}) - \kappa_0]}{\partial z} \right\}^2 dv \end{aligned} \quad (19)$$

onde  $w_s$ ,  $w_x$ ,  $w_y$  e  $w_z$  são funções espacialmente dependentes, nas quais a primeira representa a proximidade do modelo final e o de referência, e as últimas três possibilitam o aumento ou atenuação de gradientes identificados na região. Se a geologia local e os dados interpretados sugerem que existe uma rápida transição entre litologias no modelo o peso é diminuído, se for gradual ele é aumentado, proporcionando um melhor ajuste. Já os parâmetros  $\alpha_s$ ,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  e  $\alpha_z$  controlam a variação direcional da função objetivo utilizando a derivada na direção leste-oeste, a derivada na direção norte-sul e a derivada vertical, respectivamente. Os fatores  $\kappa_0$  e  $\kappa_r$  representam as susceptibilidades iniciais e no ponto  $r$ ,  $w(\mathbf{r})$  representa a função peso generalizada para o ponto, atribuindo maior peso a células mais profundas. Isso permite que o modelo varie em profundidade e não se concentre somente em superfície (LI; OLDENBURG, 1996, 2003).

Limitando a minimização da função objetivo, são inseridos limites de susceptibilidade magnética ( $\kappa_{min}$  e  $\kappa_{max}$ ), restringindo o modelo resultante a valores esperados para a área que está sendo estudada. Essa parametrização é dada por:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_d + \beta \Phi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^M [\ln(\kappa_j - \kappa_{j \min}) + \ln(\kappa_{j \max} - \kappa_j)] \quad (20)$$

onde  $\lambda$  é o parâmetro limite que previne a minimização da função objetivo e a impede de cruzar os limites máximos e mínimos de susceptibilidade magnética imposto pelo usuário. Estes limites são geralmente impostos com base nas susceptibilidades médias conhecidas para a área de pesquisa.

Com a aplicação correta de tais parâmetros, o conhecimento da geologia local e a interpretação geofísica dos dados, pode-se obter modelos de susceptibilidade das anomalias magnéticas, bem como, a sua distribuição espacial em profundidade. O *software* utilizado para a inversão de dados magnéticos deste projeto de pesquisa foi o MAG3D®, desenvolvido

pela *University of British Columbia (UBC) – Geophysical Inversion Facility (UBC-GIF®)*, com o algoritmo desenvolvido por Li e Oldenburg (1996, 2003).

#### 4 DADOS GEOFÍSICOS

Os dados geofísicos utilizados neste trabalho são parte dos Projetos Aerogeofísicos 1091 – Pernambuco-Paraíba e 1092 – Projeto Aerogeofísico Paraíba – Rio Grande do Norte desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), como parte do Programa Geologia do Brasil (PGB). Nestes projetos foram efetuados 286.377,07 km de perfis aerogeofísicos lineares, compreendendo grande parte dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia e Alagoas (Figura 9).

Figura 9 – Localização dos projetos aerogeofísicos 1091 e 1092 integrados em relação ao Brasil no polígono preto achurado e a localização da área de pesquisa no polígono vermelho.



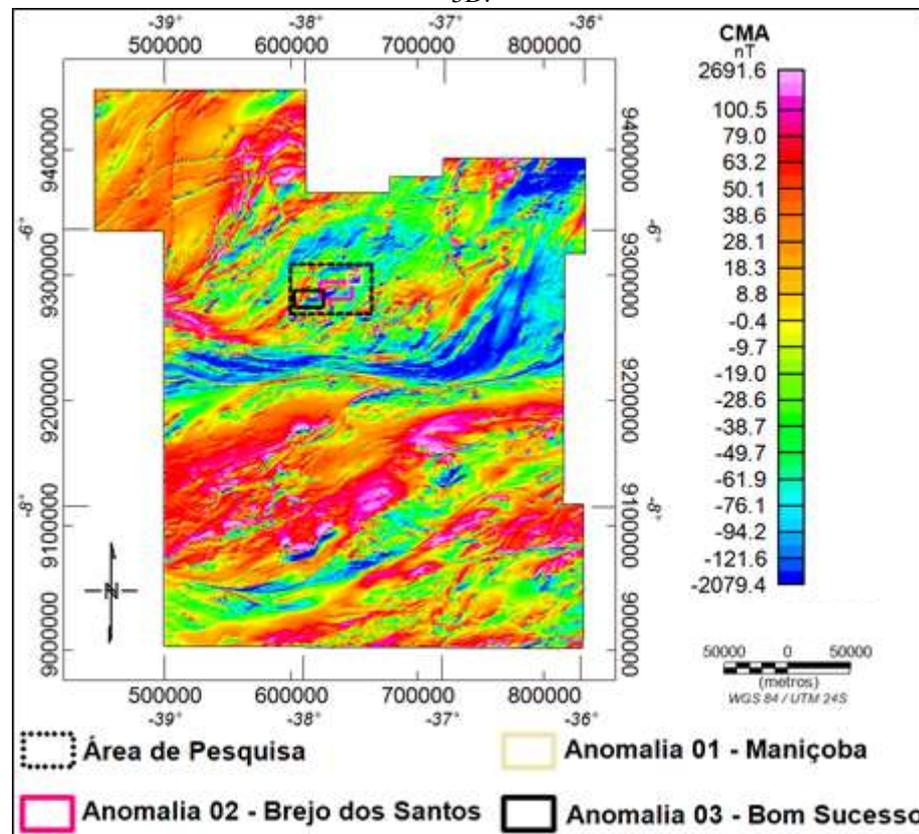
Fonte: O Autor (2019).

O aerolevanteamento contou com linhas de voo espaçadas de 500 m na direção N-S e linhas de controle espaçadas em 10 km com direção E-W, com altura de voo de 100 m acima do terreno efetuados pelas empresas LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S/A e PROSPECTORS AEROLEVANTAMENTOS E SISTEMAS LTDA contratadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Nestes voos foram tolerados até 100 m de desvio lateral para as linhas aerolevantadas e cerca de  $\pm 15$  m na altitude, salvo exceções que prejudicariam a segurança de voo. Os voos foram iniciados em 29/01/2009 e finalizados em 10/09/2009.

As leituras do magnetômetro (Scintrex CS-3) foram realizadas com frequência de 10 Hz, já para as medidas gamaespectrométricas (Exploranium GR-820) a frequência é de 1 Hz. A velocidade aproximada de voo foi estimada em 270 km/h, o que possibilitou que a amostragem de dados a cada 7,5 metros para magnetometria e de 75 metros para a gamaespectrometria, considerando suas respectivas frequências de aquisição.

A partir da análise dos dados geofísicos, selecionaram-se três anomalias magnéticas denominadas de Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso (Figura 10). As referidas anomalias alojam-se no interior do Batólito de Catolé do Rocha e contam com assinaturas magnéticas e radiométricas (Figuras 10 e 11). As anomalias magnéticas possuem magnetização normal, para o hemisfério sul, com duas delas (Brejo dos Santos e Bom Sucesso) apresentando formato alongado e uma circular (Maniçoba). Os dados radiométricos possuem também assinaturas com formas coerentes àquelas vistas nos dados magnéticos.

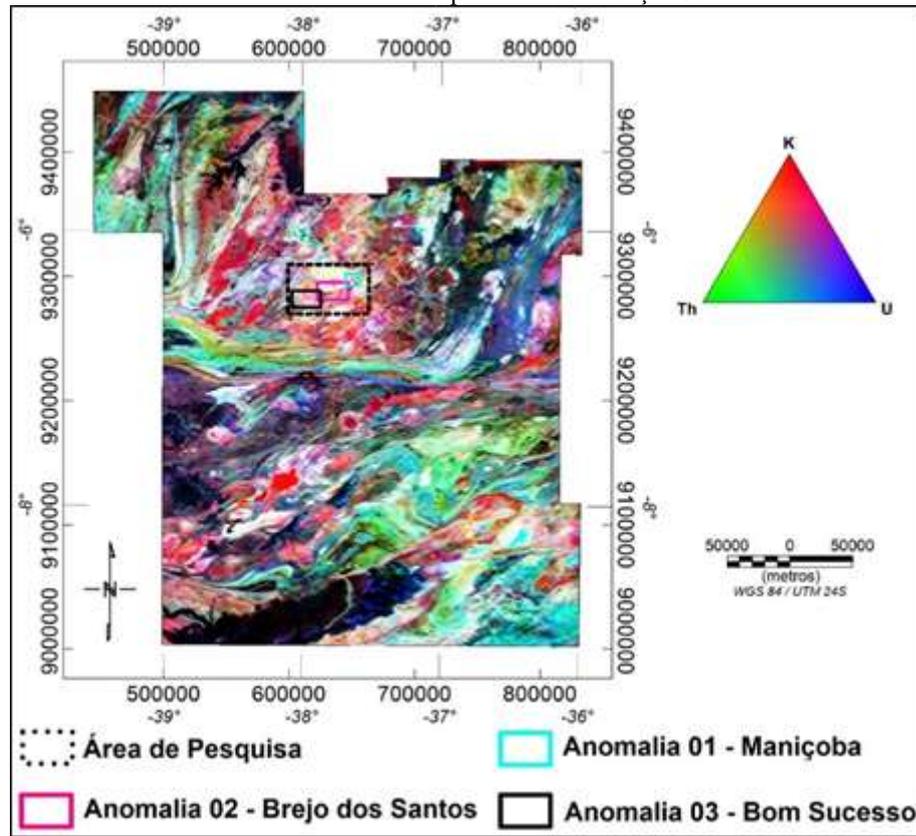
Figura 10 – Mapa do campo magnético anômalo (CMA), obtido a partir dos dados aero-magnéticos disponibilizados pela CPRM para os projetos aerogeofísicos 1091 – Pernambuco-Paraíba e 1092 – Paraíba – Rio Grande do Norte, com a área de pesquisa no polígono pontilhado e as anomalias escolhidas para a caracterização 3D.



Nota: Anomalia 01 – Maniçoba, polígono palha; Anomalia 02 – Brejo dos Santos, polígono rosa; Anomalia 03 – Bom Sucesso polígono preto.

Fonte: O Autor (2019).

Figura 11 – Mapa ternário de K, Th e U obtidos a partir dos projetos aerogeofísicos 1091 – Pernambuco – Paraíba e 1092 – Paraíba – Rio Grande do Norte, com a área de pesquisa no polígono pontilhado em preto e as anomalias escolhidas para a caracterização 3D.



Nota: Anomalia 01 – Maniçoba, polígono azul claro; Anomalia 02 – Brejo dos Santos, polígono rosa; Anomalia 03 – Bom Sucesso, polígono preto.

Fonte: O Autor (2019).

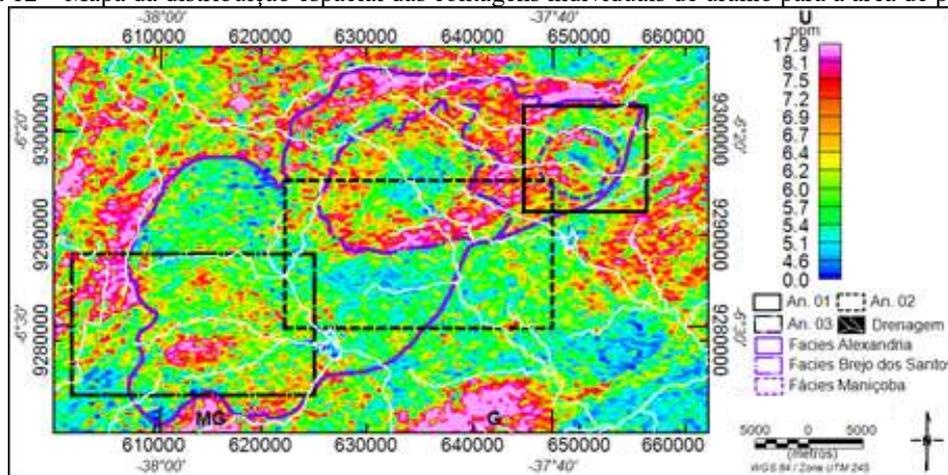
## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste trabalho serão apresentados a seguir de forma ordenada conforme a interpretação evoluiu.

### 5.1 GAMAESPECTROMETRIA

As contagens de U (Figura 12) demonstram altas concentrações na região noroeste da área, correlacionadas com estruturas NE-SW da Suíte Poço da Cruz, com valores entre 8,0 e 17,9 ppm. A região leste possui altas contagens, porém de menor extensão em relação as da região noroeste, podem ser correlacionadas a estruturas também NE-SW, em granitoides indiferenciados e granitos nessa região, com valores semelhantes. Na região sul altas contagens são relacionadas a corpos geológicos com valores que chegam a 17,9 ppm, representando metagranitóide (MG) a oeste e granitóide (G) a leste. O Batólito de Catolé do Rocha apresenta alta contagem de U principalmente em seus limites a nordeste, com assinaturas que variam de 6 a 17,9 ppm.

Figura 12 – Mapa da distribuição espacial das contagens individuais de urânio para a área de pesquisa.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha. MG – metagranito; G – granito.

Fonte: O Autor (2019).

Nas áreas relacionadas à anomalia Maniçoba (An. 01 na Figura 12) são observados padrões circulares de altas contagens de U, com picos chegando a 12,50 ppm. A anomalia Bom Sucesso apresenta contagens de U variando de 7 a 11,27 ppm com padrão alongado (An. 03 na Figura 12), enquanto a anomalia Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 12) não apresenta assinaturas na área selecionada.

Analisando as fácies identificadas no mapa geológico (Figura 4 e Figura 12), as fácies Maniçoba e Brejo dos Santos apresentam correlação com baixas contagens individuais de U.

Na fácies Alexandria, que representa toda a parte externa do batólito, foi possível observar de dois padrões contrastantes. Na região sudoeste, o batólito apresenta baixa contagem de U com média de 6 ppm. Já a região nordeste, as contagens são consideravelmente mais altas chegando a 17,9 ppm. Não foi possível notar qualquer correlação de U com a fácies Alexandria, com isso, sugere-se que existam dois padrões contrastantes de concentrações de U, ou ainda que esta fácies possa ser separada em duas em virtude das concentrações de U.

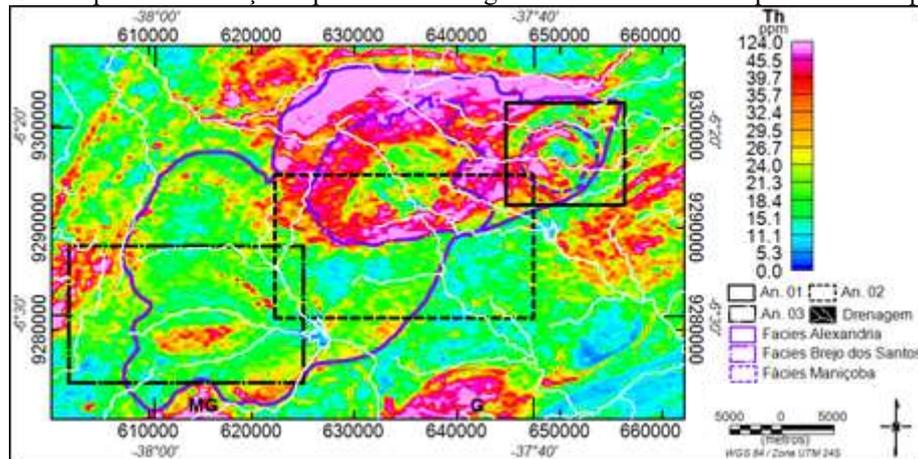
As contagens de Th seguem o mesmo padrão que as apresentadas pelo U (Figura 13). Porém as assinaturas de Th não apresentam comportamento tão disperso quanto às do U. A partir da análise desse mapa identificaram-se cisalhamentos NE-SW na suíte Poço da Cruz a noroeste do batólito, com concentração maior a SW (124 ppm), diminuindo conforme se afasta em direção NE. Identifica-se a sul o metagranitóide (MG), a oeste e granitóide (G) a leste, com concentrações variando de 25 a 124 ppm, interpretado no mapa de concentração de U. A leste são identificadas estruturas NE-SW, em granitóides indiferenciados, metagranitóides e granitos, com altas concentrações de Th (variando de 20 a 50 ppm).

Na porção norte é possível identificar uma estrutura E-W aproximadamente linear com contagens que atingem concentração de 50 ppm de Th, além de assinatura circular com altas contagens na borda (aproximadamente 124 ppm) e o centro com menor concentração (15 – 45 ppm), interpretado como um corpo satélite do Batólito de Catolé do Rocha. A sudeste do mapa é possível observar padrões intercalados de altas contagens de Th (30 – 50 ppm) e baixas (~10 ppm) de direção NE-SW internas ao Complexo Caicó. O Batólito de Catolé do Rocha, assim como observado para o U, apresenta concentrações elevadas de Th (124 ppm) na parte nordeste do corpo e concentrações baixas a intermediária na região sudoeste.

Essa semelhança pode ser explicada devido ao comportamento geoquímico similar de ambos. Para as anomalias selecionadas, Maniçoba apresenta padrão circular com altas concentrações de Th, atingindo 129 ppm. A anomalia de Brejo dos Santos apresenta um padrão de contagens baixo a intermediário, variando de 10 a 20 ppm. A anomalia de Bom Sucesso apresenta para o Th o mesmo padrão alongado na direção E-W observado para o U, com concentrações baixas a norte variando de 14 a 18 ppm e atingindo ao sul 107 ppm.

Com relação às fácies Alexandria, Brejo dos Santos e Maniçoba, pode ser identificado o mesmo padrão observado para o U, com baixas contagens de Th para a fácies Maniçoba. A fácies Brejo dos Santos varia em torno de 20 ppm de Th. Já a fácies Alexandria conta com altas concentrações de Th para a região nordeste do batólito, e baixa a intermediária para a região sudoeste, podendo corroborar com sugestão proposta para o U de que houve uma possível diferenciação na fácies Alexandria.

Figura 13 – Mapa da distribuição espacial das contagens individuais de tório para a área de pesquisa.



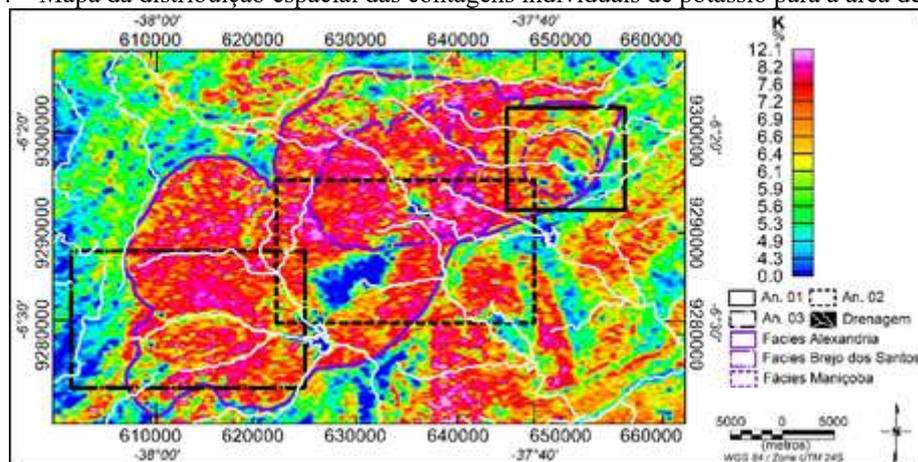
Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

MG – metagranito; G – granito.

Fonte: O Autor (2019).

Para o radioelemento K, nota-se uma distribuição ao longo de todo o Batólito de Catolé do Rocha, sendo possível identificar os limites laterais do corpo (Figura 14). Sua concentração varia de forma ampla no interior do batólito com o máximo de 12,1 %. Na região sudeste da área investigada, existe também uma possível correlação com a estrutura NE-SW a sul do complexo Caicó, onde são identificados padrões com contagens baixas, variando de 2 a 4 % intercalados com contagens mais altas, que chegam a 10 %.

Figura 14 – Mapa da distribuição espacial das contagens individuais de potássio para a área de pesquisa.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

Para as anomalias selecionadas, é possível notar padrões circulares em Maniçoba (An. 01 na Figura 14), onde existem concentrações intermediárias de K (6,0-11,0%)

intercaladas com baixas concentrações (até 4%). A anomalia de Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 14) apresenta concentrações variando de 0 a 4,5%, revelando de forma precisa os limites laterais do corpo anômalo, não mapeado geologicamente. Esta assinatura indica a possibilidade deste corpo anômalo ser aflorante ou que seu alojamento possui reflexos superficiais. A anomalia de Bom Sucesso (An. 03 na Figura 14) conta com padrão alongado segundo a direção E-W apresentando alta concentração de K a sul (até 9 %) e intermediária a norte (entre 5 e 7 %).

Com relação às fácies analisadas, apenas a fácies Alexandria pode ser notada em toda sua extensão, com altas contagens de K. Na região a nordeste, o corpo possui maior extensão que o identificado pelo mapa geológico. A fácies Maniçoba pode ser inferida, porém não com tanta clareza quanto para U e Th. A fácies Brejo dos Santos não possui nenhuma correlação com o K, que possa ser utilizada para separação.

A composição ternária dos radioelementos U, Th e K é apresentada em conjunto com o modelo digital de terreno (MDT) (Figuras 15A e 15B). Este mapa demonstra na região leste da área de pesquisa estruturas NE-SW com maior concentração de Th a sudoeste e maior concentração de U na parte nordeste.

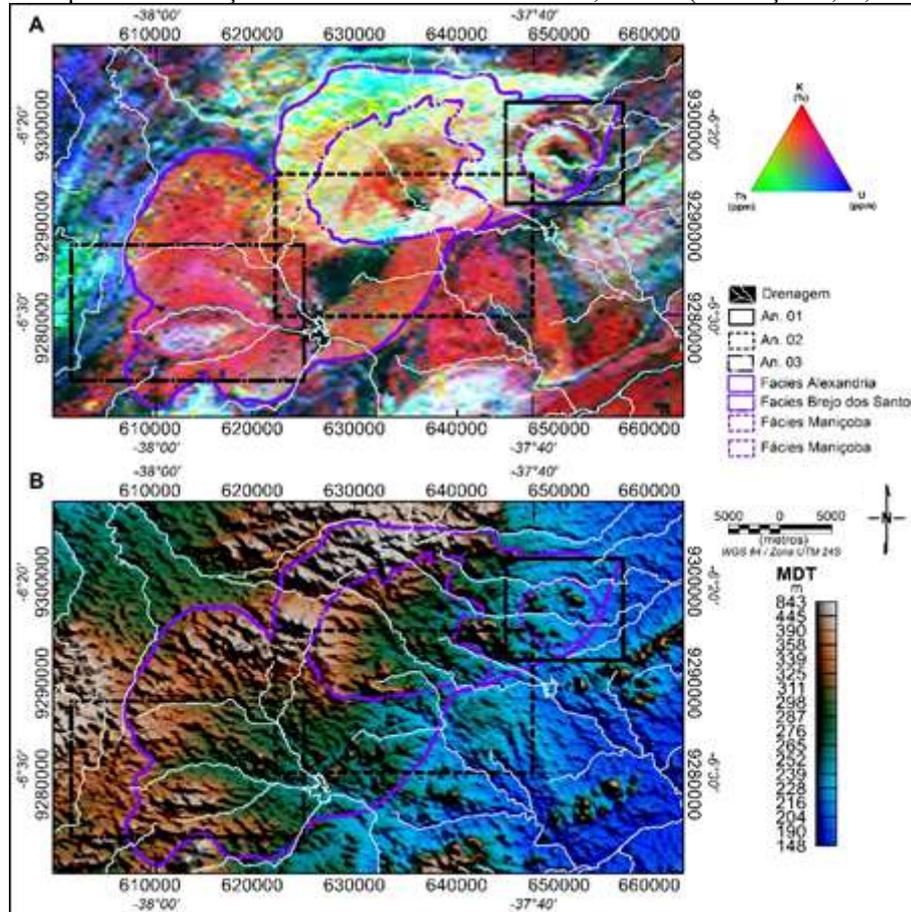
A região a norte do batólito apresenta uma estrutura aproximadamente linear E-W que é truncada por um corpo aproximadamente circular com auréola de mais baixa contagem dos três radioelementos externa e com centro com alto de U, Th e K (Figura 15A). Essa estrutura foi interpretada como um corpo satélite do Batólito de Catolé do Rocha podendo apresentar metamorfismo nos limites laterais ocorrido durante seu alojamento, justificando assim a assinatura radiométrica identificada. A região oeste (Figura 15A), externa ao batólito, apresenta assinatura de altas concentrações de U, Th e K, sendo representado por corpos granitóides destas áreas, encaixados segundo a direção NE-SW.

A região sudeste (Figura 15A), externa ao batólito, apresenta contagens mais altas de K em estruturas NE-SW e uma faixa de baixas contagens no centro. Esta faixa pode ser causada por uma drenagem que ocorre na área ou por estrutura tectônica, não sendo possível sua distinção pela baixa penetrabilidade do método radiométrico e pela ocorrência de cobertura sedimentar nesta região. Porém, muitas drenagens são conhecidas por terem seu caminho facilitado por estruturas geológicas.

A nordeste (Figura 15A), externa ao batólito, ocorre um corpo alongado na direção NE-SW, estendendo-se até um corpo granítico localizado na região centro-sudeste. Esta faixa foi interpretada como parte do complexo Caicó. O corpo granítico na porção sul conta

com altas contagens de U, Th e K em toda sua extensão e com auréola de altas contagens de K, não sendo possível observar correlação entre ambos através do mapa geológico da área.

Figura 15 – Mapa de visualização ternária dos radioelementos U, Th e K (Coloração R, G, B = K, Th, U).



Nota: A – Modelo Digital de Terreno (MDT). B – Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

Na porção sul da área (Figura 15A) foi identificada outra região com altas concentrações dos três radioelementos, caracterizada por metagranitóides da suíte Poço da Cruz. Na área sudoeste desse mapa, no limite entre este corpo e o Batólito de Catolé do Rocha, encontra-se uma porção com mais alta concentração de Th e U, alinhada segundo a direção NE-SW. A alta concentração de U é vista principalmente nos limites SW do batólito. O Batólito de Catolé do Rocha apresenta altas contagens de U, Th e K na região nordeste do corpo. Em sua região sudoeste apresenta alta concentração de K em relação ao Th e U, com exceção de uma anomalia alongada no extremo dessa região com altos de U, Th e K.

A fácies Maniçoba (An. 01 na Figura 15A) tem padrão de baixas concentrações dos três radioelementos no centro. Essa fácies apresenta auréola estreita (média de 800 metros)

com maior concentração de K, sendo uma possível área de alteração hidrotermal. Outra região circular externa a esta última e concêntrica, é identificada com maior espessura (cerca de 1500 metros) com altas concentrações de U, Th e K e, externa a esta, uma terceira auréola de alta concentração de K com eventuais baixos dos três radioelementos.

Para a fácies Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 15A) é identificada altas contagens de K, com exceção de duas porções a sul, que representam corpos d'água represados. Algumas porções internas a esta fácies apresentam altas concentrações de Th. A fácies Alexandria conta com altos de U, Th e K a nordeste, e altas concentrações de K a sudoeste.

Todas as anomalias selecionadas possuem contrastes significativos nos padrões dos radioelementos (Figura 15A). A anomalia de Maniçoba (Figura 15A) possui o padrão similar ao da fácies Maniçoba (An. 01 na Figura 15A), existindo a possibilidade de ocorrência de alteração hidrotermal. A anomalia de Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 15A) apresenta baixas concentrações de U, Th e K e está localizada na região de transição entre altas concentrações dos três radioelementos para apenas altas concentrações de K do Batólito de Catolé do Rocha. Esta anomalia apresenta formato alongado na direção NE-SW, sendo mais espessa a sudoeste e diminuindo de espessura conforme se projeta para nordeste. A anomalia de Bom Sucesso (An. 03 na Figura 15A) apresenta altas contagens de U, Th e K, com formato alongado segundo a direção ENE e alguns resquícius de baixas contagens dos três radioelementos a norte, sendo possível a identificação de tal padrão pelas drenagens que circundam a anomalia.

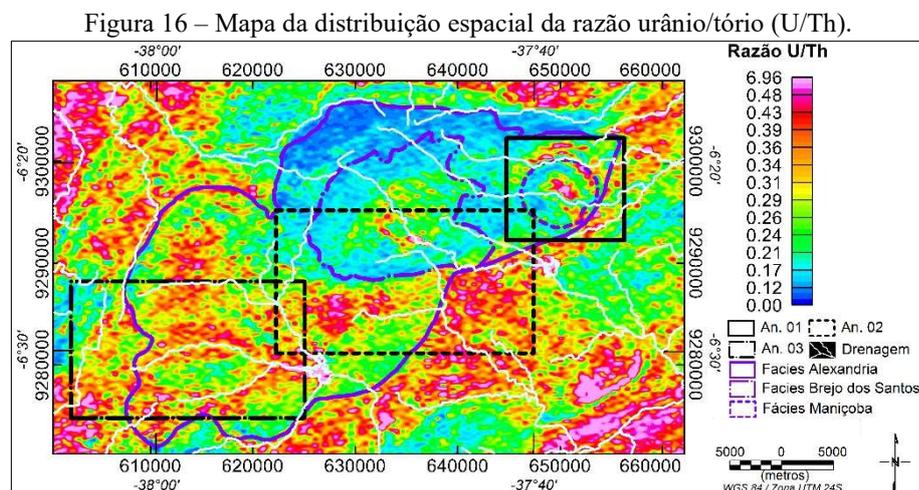
O MDT (Figura 15B) se correlaciona bem o comportamento geoquímico dos radioelementos. Através da comparação desse mapa com o ternário (Figura 15A) é possível identificar dois padrões contrastantes de drenagem, o primeiro com direção preferencial noroeste e o segundo com direção sudeste.

As morfoestruturas mais marcantes da área tem direção preferencial NW-SE, porém é possível identificar outras NE-SW, menos expressivas, na região oeste. As feições NW-SE são sugeridas como mais novas em relação as NE-SW, em virtude de suas assinaturas no MDT (Figura 15B).

As anomalias selecionadas são identificáveis no MDT (Figura 15B). O padrão circular das estruturas fica evidente para a anomalia de Maniçoba (An. 01 na Figura 15B). A anomalia de Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 15B) exhibe o padrão alongado NE-SW, com maior expressão na parte sudoeste. Esta expressão diminui em direção a nordeste, representado por topografia intermediária na região da anomalia, enquanto exhibe padrão de alto topográfico no

contato norte. A anomalia de Bom Sucesso (An. 03 na Figura 15B) apresenta padrão contrastante de alto topográfico a sul e baixo a intermediário a norte.

A razão U/Th indica maior concentração de U em relação ao Th na parte oeste, noroeste e sudoeste externas ao batólito (Figura 16). Ainda podem ser apontadas as maiores razões nas regiões nordeste e sudeste, demonstrando associação com as estruturas NE-SW na Suíte Poço da Cruz. A região sul exhibe menores valores das razões U/Th sendo caracterizadas por metagranitóide a oeste e granitóide a leste. O Batólito de Catolé do Rocha conta com comportamentos contrastantes, onde apresenta menor razão U/Th na região nordeste, com exceção de duas áreas, representadas pelas fácies Maniçoba e Brejo dos Santos. A sudoeste existe a ocorrência de razões altas a intermediárias, caracterizado pela maior concentração de U em relação ao Th.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

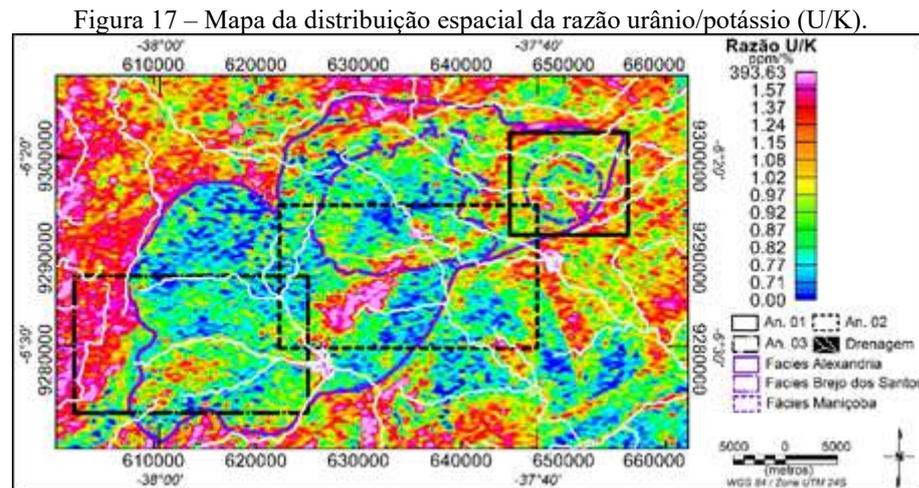
Fonte: O Autor (2019).

As anomalias selecionadas exibem assinaturas diferentes para Maniçoba (An. 01 na Figura 16), onde o padrão concêntrico ainda é identificável, representado por intercalações de altas e baixas razões de U/Th. Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 16) exhibe altas razões U/Th sendo possível identificar os limites do corpo anômalo. Já a anomalia de Bom Sucesso (An. 03 na Figura 16) apresenta o padrão alongado segundo a direção E-W, com razões baixas a intermediárias a sul do corpo anômalo e altas a norte.

Para a razão U/K é possível notar que na região externa o Batólito de Catolé do Rocha possui alta razão (Figura 17). Toda a região a oeste, externa ao batólito, conta com as mais altas razões de toda região, possivelmente influenciadas tanto pelas litologias quanto pelas estruturas dessa área (possíveis falhas ou cisalhamentos). A sudeste é possível identificar

faixas de baixa e alta razão U/K, indicando as estruturas dessa área com intercalação de altas contagens de U, com altas contagens de K.

A fácies Alexandria (Figura 17), que conta com baixas razões U/K em praticamente toda a extensão do batólito. Também é possível a identificação da fácies Maniçoba e seu padrão concêntrico e intercalação de altas e baixas razões. A fácies Brejo dos Santos não possui nenhum indicativo neste mapa de razão.



Para as anomalias selecionadas, é possível identificar o padrão concêntrico da anomalia de Maniçoba e a anomalia de Brejo dos Santos com altas razões U/K (Figura 17). A anomalia de Bom Sucesso não ocorre de forma tão pronunciada quanto às outras anomalias, sendo caracterizada por razões baixas a intermediárias.

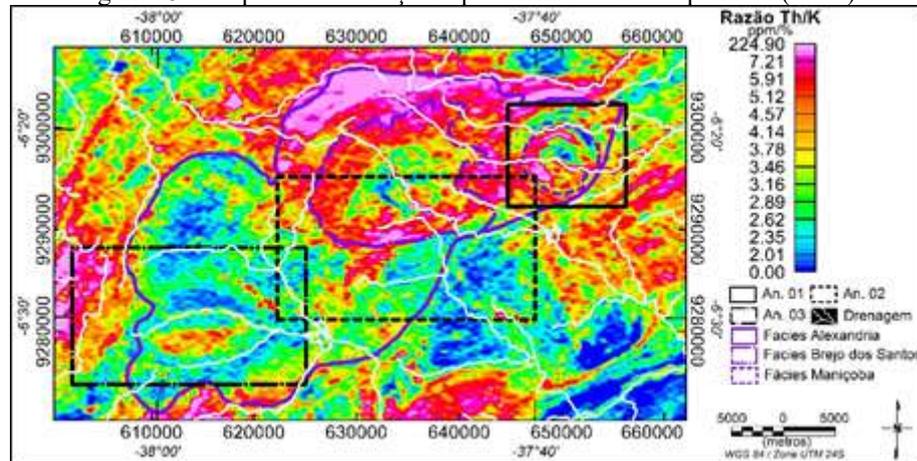
Com a razão Th/K identificam-se estruturas a oeste e a leste do Batólito de Catolé do Rocha (Figura 18) em direções NE-SW. A estrutura a oeste, no entanto, apresenta inclinação menor (N30E) que a estrutura a leste (N60E), onde estas estruturas são mapeadas geologicamente como lineamentos. As altas razões a sul, nos limites da área de pesquisa, indicam que o granitóide a oeste e o metagranitóide a leste possuem mais altas concentrações de Th em relação ao K. A região sudeste apresenta altas razões Th/K intercaladas com baixas, deixando evidentes as estruturas dessa área e sua correlação com o complexo Caicó.

Com a razão Th/K identificam-se estruturas a oeste e a leste do Batólito de Catolé do Rocha (Figura 18) em direções NE-SW. A estrutura a oeste, no entanto, apresenta inclinação menor (N30E) que a estrutura a leste (N60E), onde estas estruturas são mapeadas geologicamente como lineamentos. As altas razões a sul, nos limites da área de pesquisa, indicam que o granitóide a oeste e o metagranitóide a leste possuem mais altas concentrações de Th em relação ao K. A região sudeste apresenta altas razões Th/K intercaladas com baixas, deixando evidentes as estruturas dessa área e sua correlação com o complexo Caicó.

A fácies Maniçoba (Figura 18) é caracterizada pelo padrão circular identificado nos mapas anteriores, porém apresenta maiores contrastes que facilitam sua caracterização. Também podem ser apontadas as baixas razões dos corpos máfico/intermediário mapeados. A fácies Brejo dos Santos (Figura 18) é caracterizada por baixas razões internas e altas razões

externas. A fácies Alexandria, apresenta o mesmo padrão identificado em outros temas, com altas razões a NE e baixas a SW.

Figura 18 – Mapa da distribuição espacial da razão tório/potássio (Th/K).



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

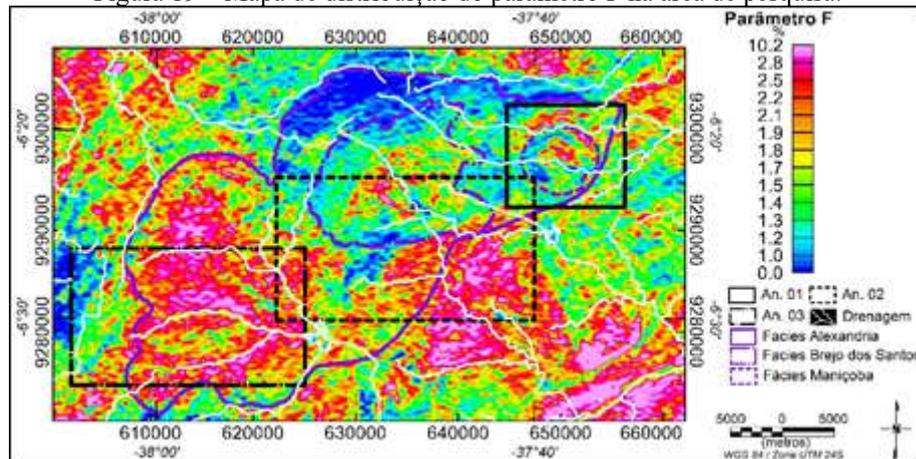
Para as áreas das anomalias selecionadas são identificadas apenas a anomalia de Maniçoba (An. 01 na Figura 18), que conta com o padrão concêntrico característico: centro com baixa razão Th/K e intercalações de razões altas e intermediárias. A anomalia de Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 18) não possui nenhum padrão marcante nas razões. A anomalia de Bom Sucesso (An. 03 na Figura 18) conta com padrão alongado segundo a direção E-W com razões intermediárias a altas a sul e baixas a norte.

O parâmetro F (Figura 19), pode indicar associações hidrotermais, a partir do enriquecimento de U e K em detrimento de Th, considerando principalmente a diferença de mobilidade do K e do U. Isto é refletido principalmente a noroeste e sudeste, onde se encontram altos valores. A região centro-sudoeste apresenta continuação das estruturas, com valores mais baixos. Este comportamento sugere a possibilidade de ação hidrotermal, visto que as assinaturas radiométricas corroboram com os lineamentos geológicos, os quais podem servir de condutos para a migração de fluídos hidrotermais. O granito e o metagranito identificados a sul possuem valores de parâmetro F baixos a intermediários.

Na região interna do Batólito de Catolé do Rocha, é possível identificar relações mais baixas de parâmetro F na região a norte, ao passo que a parte sudoeste do corpo possui essa relação superior. A fácies maniçoba (Figura 19), demonstra o parâmetro F com comportamento concêntrico. O centro desta fácies e seus limites laterais apresentam altos valores, principalmente na região norte e nordeste, sugerindo processos de hidrotermalismo.

A fácies Brejo dos Santos (Figura 19) demonstra padrão de alto parâmetro F em toda sua extensão, com destaque em sua região central. A fácies Alexandria (Figura 19) não apresenta correlação em sua extensão, apresentando o mesmo comportamento identificado em outros mapas, baixa relação a nordeste e alta a sudoeste.

Figura 19 – Mapa de distribuição do parâmetro F na área de pesquisa.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

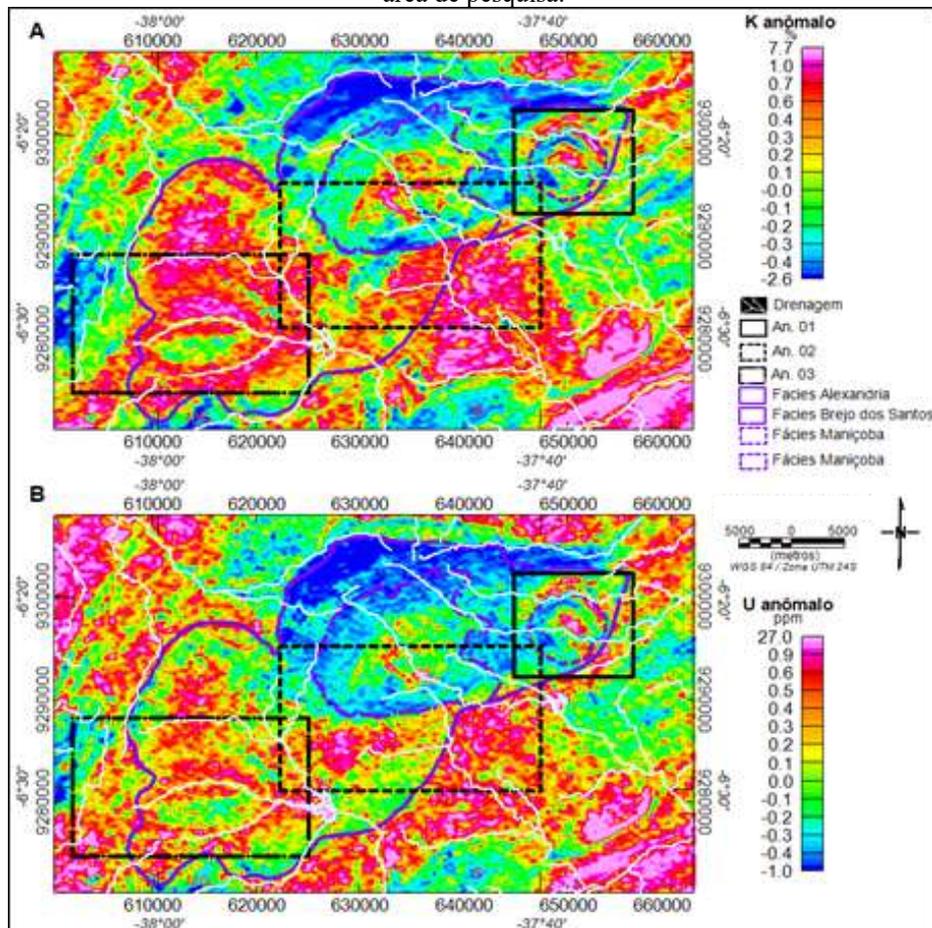
É possível identificar todas as anomalias selecionadas com o parâmetro F (Figura 19). A anomalia de Maniçoba (An. 01 na Figura 19) apresenta o padrão circular já identificado em outros mapas radiométricos. A anomalia de Bom Sucesso (An. 02 na Figura 19) apresenta o padrão alongado, porém de valores intermediários na região sul e altos na norte, e em seu centro apresenta intercalações entre valores altos e intermediários, com potencial de hidrotermalismo nesta região. A anomalia de Brejo dos Santos (An. 03 na Figura 19) possui baixos valores do parâmetro F.

Os mapas de U e K anômalos (Figuras 20A e 20B), reproduzem em grande parte os comportamentos identificados pelo parâmetro F. Altas contagens nas regiões noroeste e sudeste, demonstrando associação com as estruturas identificadas nessa região. Foi possível visualizar o metagranito (MG) e o granito (G) na parte sul da área de pesquisa. Ambos os corpos apresentam baixos dos valores de U e K anômalos.

No Batólito de Catolé do Rocha, as assinaturas de K anômalo (Figura 20A) são mais pronunciadas para a parte sudoeste do corpo, sendo possível a caracterização de seus limites em valores altos de K anômalo. O U anômalo (Figura 20B) do batólito tem maior complexidade, visto que os limites laterais na região a NW e a SE do batólito, tem assinaturas

muito discretas se comparadas ao K, sendo necessário a utilização de outros mapas para suas caracterizações.

Figura 20 – Mapa de distribuição do potássio anômalo (K anômalo) (A) e urânio anômalo (U anômalo) (B) na área de pesquisa.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão e as linhas brancas são as drenagens da área. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

MG – metagranito; G – granito.

Fonte: O Autor (2019).

Nas fácies, os comportamentos de U e K anômalos são similares aos do parâmetro F, sendo possível identificar a fácies Maniçoba e seus padrões circulares característicos (An. 01 nas Figuras 20A e 20B). A fácies Brejo dos Santos (Figuras 20A e 20B), mantém o padrão, porém com assinaturas mais fortes para o K anômalo que para o U anômalo. A fácies Alexandria (Figuras 20A e 20B) não demonstra correlação com nenhum dos mapas de anômalos, apresentando ainda a mesma assinatura vista em outros produtos.

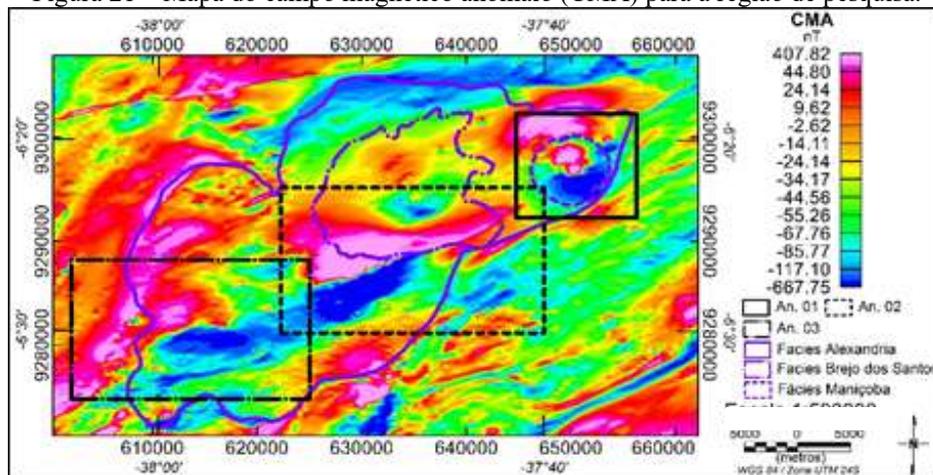
É possível caracterizar as três anomalias selecionadas utilizando o U e K anômalos. Os padrões são similares para as anomalias de Maniçoba e Bom Sucesso (An. 01 e 02 nas Figuras 20A e 20B), circular para Maniçoba e alongado para Bom Sucesso. As assinaturas

apresentam contraste maior para o K que para U anômalo. Na anomalia de Brejo dos Santos (Figuras 20A e 20B), ocorrem altos valores de U anômalo e baixos valores de K anômalo, sendo esta diferença explicada pela maior concentração de U em relação ao Th e menor de K, para esta área.

## 5.2 MAGNETOMETRIA

Devido à característica vetorial do campo magnético, a resposta magnética de um dado corpo depende se sua localização no planeta e da existência de magnetização remanente significativa. Na área de pesquisa, a inclinação e declinação média do campo geomagnético é de  $-20,54^\circ$  e  $-21,92^\circ$ , respectivamente. Essa orientação gera anomalias magnéticas cujas polarizações normais são caracterizadas por porções positivas a norte e negativas a sul, no hemisfério sul. O Batólito de Catolé do Rocha conta com assinatura de seus limites bem demarcados pelo campo magnético anômalo (CMA) e seus valores na área de pesquisa variam de  $-667,75$  a  $407,82$  nT (Figura 21).

Figura 21 – Mapa do campo magnético anômalo (CMA) para a região de pesquisa.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

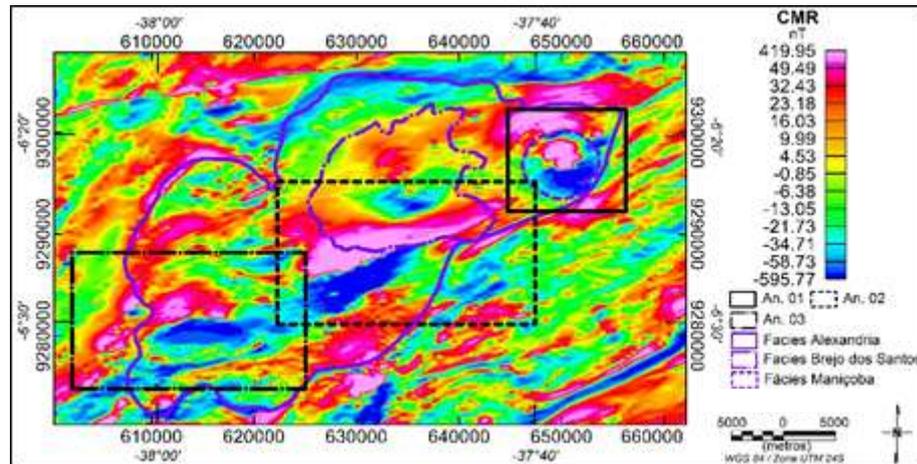
A região a oeste do batólito (Figura 21) possui estruturas magnéticas aproximadamente N30E. A região sudeste da área apresenta estrutura marcante, com forte anomalia alinhada na direção N60E. No extremo noroeste, fora dos domínios do batólito, ocorre uma estrutura magnética linear aproximadamente leste-oeste com uma possível relação a diques básicos mesozoicos do magmatismo básico da formação Basalto Rio Ceará-Mirim, associados ao processo de abertura do oceano Atlântico.

A fácies Maniçoba apresenta anomalia magnética pronunciada (Figura 21), aflorante segundo as assinaturas radiométricas (Figura 15A). A fácies de Brejo dos Santos não possui assinaturas radiométricas ou magnéticas pronunciadas (Figura 21 e Figura 15A), sugerindo uma fonte mais profunda ou uma litologia que permita tal assinatura. Uma intrusão em profundidade pode causar variações composicionais em superfície como observado nas assinaturas radiométricas através dos efeitos termais ou alterações geomorfológicas.

Um operador de continuação pra cima com altitude de 2000 metros, foi utilizado para a remoção regional-residual (Figura 22). Uma vez removida as contribuições profundas (eq. 9), foram realçadas as variações dos comportamentos magnéticos mais superficiais para a área de estudo em virtude da variação dos contrastes susceptibilidades que as rochas da área apresentam. Após a remoção regional-residual (Figura 22), a variação dos dados magnéticos da área ocorre de -595,77 a 419,95 nT. Com esta técnica os contornos magnéticos do Batólito de Catolé do Rocha ficaram melhor ressaltados, sendo possível notar as estruturações na parte externa do batólito, principalmente a noroeste e a sudeste. O lineamento magnético a noroeste com direção aproximadamente E-W, pode ser associado a diques básicos referentes ao processo de abertura do oceano Atlântico, citados anteriormente.

As anomalias magnéticas selecionadas (retângulos em preto na Figura 22) se alinham na direção NE-SW, seguindo a orientação do Batólito de Catolé do Rocha e da maior parte das estruturas magnéticas identificadas na área de pesquisa. O batólito (linha roxa continua na Figura 22) apresenta seu eixo principal com direção N60E, compatível com outras estruturas magnéticas da área. Dentre estas, podem ser ressaltadas as assinaturas localizadas a sudeste, onde pode-se inferir uma zona de cisalhamento profunda, com reflexos superficiais, como indica a interpretação radiométrica.

Figura 22 – Mapa do campo magnético residual (CMR) representando a variação da medida magnetométrica para a região de pesquisa com a contribuição de estruturas profundas reduzida a partir da continuação para cima a uma altura de 2000 metros.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão.

Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

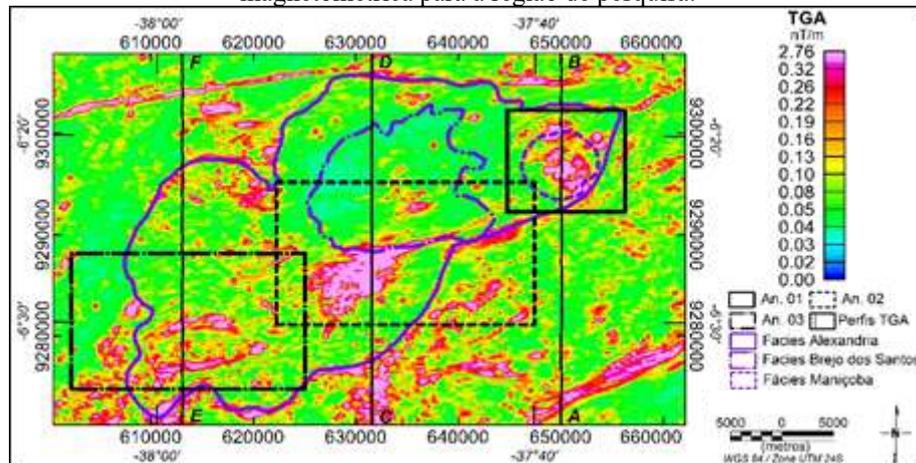
Ao sul do batólito, entre aproximadamente 610000 – 620000m e 635000 e 645000m, são identificadas assinaturas aproximadamente circulares, já interpretadas como granitóides (granito e metagranito) (Figura 12; Figura 13; Figura 15A). As assinaturas magnéticas identificadas, principalmente nos limites laterais dos granitóides, podem ocorrer devido tanto a alteração hidrotermal ou metamorfismo de contato, os quais podem produzir magnetita secundária responsável pela anomalia.

A amplitude do gradiente total (TGA) tende a centralizar maiores amplitudes sobre o corpo geológico causador da anomalia magnética. Com este filtro de realce, é possível identificar os limites laterais do Batólito de Catolé do Rocha, bem como as estruturas externas ao corpo (Figura 23). Na região a oeste do batólito, é possível observar estruturas aproximadamente N30E, já na região sudeste aparece uma série de estruturas N60E. Na região sudeste os máximos de amplitude do TGA, podem representar uma região de cisalhamento ainda não mapeada. Na noroeste, o lineamento identificado pela TGA (N80E) é truncado por estruturas N30E na área. Este fato sugere que as estruturas N30E podem ser anteriores a N80E e que as primeiras sofreram reativações com deslocamento para SW. Este fato é considerado em virtude do truncamento observado em duas regiões desta área.

As anomalias Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso, foram realçadas de forma satisfatória pelo mapa de TGA (Figura 23), onde é possível a definição de seus limites laterais. A anomalia de Maniçoba (An. 01 na Figura 23), está inserida entre duas estruturas circulares a norte e a sul. Sua assinatura indica a presença de dois corpos anômalos interiores

às estruturas apontadas, um aproximadamente circular a sul e outro alongado a norte. O corpo anômalo a norte, possui tendência de englobar ao corpo localizado a sul. Ambos os corpos aparentam ser influenciados por estruturas NE-SW que ocorrem na área.

Figura 23 – Mapa da amplitude do gradiente total (TGA) representando a amplitude do gradiente da anomalia magnetométrica para a região de pesquisa.



Nota: Os quadros em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão.

Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha e as linhas verticais em preto AB, CD e EF são os perfis escolhidos para analisar o comportamento dos corpos anômalos.

Fonte: O Autor (2019).

A anomalia de Brejo dos Santos (An. 02 na Figura 23) é composta por assinatura de formato alongado na direção NE-SW. A região sudoeste do corpo apresenta maiores dimensões, ao passo que ocorre adelgaçamento para nordeste. A direção preferencial do corpo anômalo sugere que este teve controle estrutural definido por uma estrutura NE-SW.

A anomalia de Bom Sucesso (An. 03 na Figura 23) apresenta três assinaturas importantes em seus domínios. Uma central, de maior expressão alongada na direção ENE-WSW, apresenta maiores valores e conta com os limites laterais do corpo bem marcados. Estes fatos podem representar que nesta região o corpo anômalo é mais profundo. A segunda assinatura, a sul do maior corpo, apresenta forma semi-circular, com maior eixo na direção ENE-WSW, e menor espessura que os demais. A terceira assinatura fica por conta do corpo anômalo externo ao Batólito de Catolé do Rocha, e orientado na direção NE-SW, segundo os lineamentos magnéticos dessa área.

As três anomalias seguem a tendência regional NE-SW, sugerindo que falhas controlam estruturalmente a migração e alojamento destes corpos ou até mesmo ser responsável por suas gerações, como sugerido por Vauchez et al. (1997). Estes autores propõem que uma zona de cisalhamento pode favorecer a geração de magma e a colocação de pequenos

corpos ígneos através da cinemática gerando pequenas quantidades de magma possibilitando seu alojamento segundo a direção do movimento

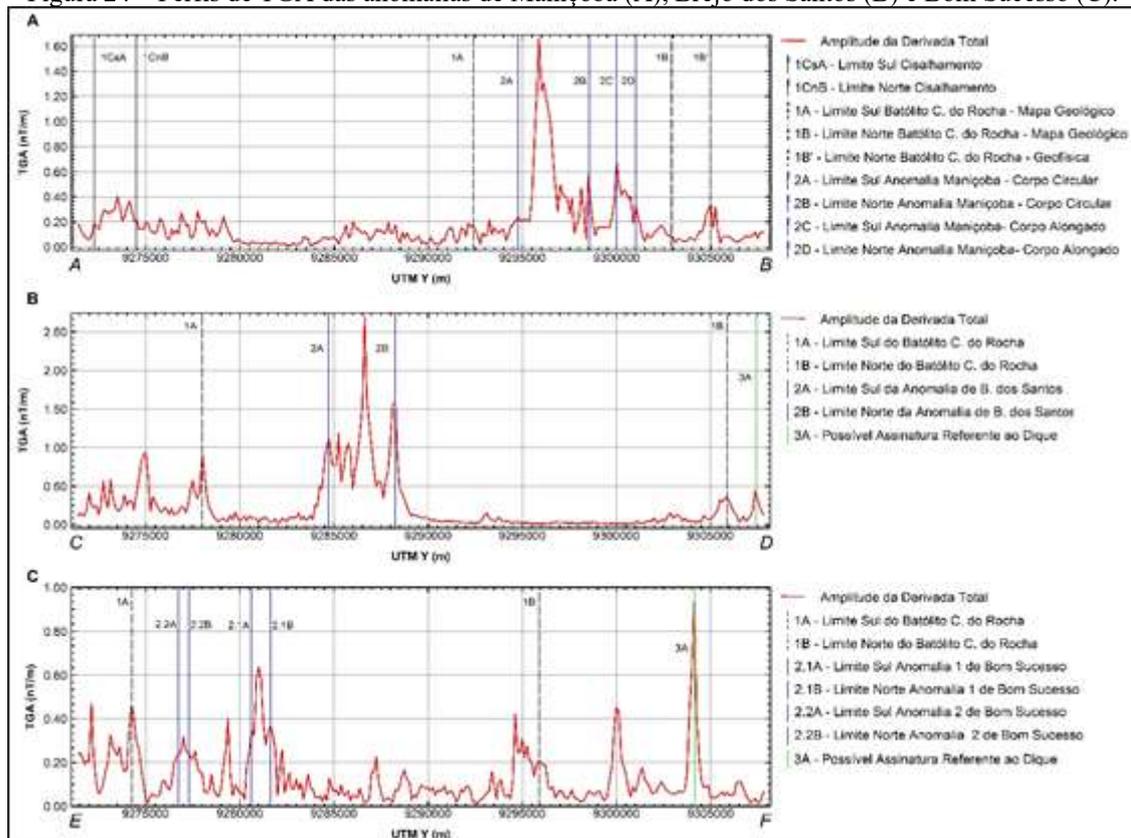
Os perfis da TGA auxiliam a análise do comportamento magnético das regiões interceptadas e demonstra a estruturação geral da área. Os perfis foram escolhidos de forma a abranger as anomalias selecionadas para a inversão (Figura 23), onde A e B representam respectivamente limites sul e norte das assinaturas mapeadas (Figura 24). O perfil *AB* (Figura 24A) demonstra na região sul uma possível influência do cisalhamento, onde é possível notar uma série de amplitudes dentro dos limites verticais traçados (1CsA e 1CnB).

Também é possível a identificação dos limites laterais do Batólito de Catolé do Rocha (Figuras 24, 1A e 1B), coincidentes na parte sul tanto com o mapa geológico da área quanto com a TGA. Há porém, na região norte, uma divergência entre o mapa geológico (1B) e os dados geofísicos (radiométricos e magnéticos, 1B'), o que sugere que o batólito possua extensão maior do que a mapeada. A área da anomalia de Maniçoba (Figura 24A) se desdobra em duas anomalias distintas (2A, B, C e D), sendo possível sua separação em um corpo a sul (2A e B) e outro a norte (2C e D). O TGA do corpo a sul possui maior amplitude e extensão em relação ao corpo a norte.

O perfil *CD* intercepta a anomalia de Brejo dos Santos (Figura 24 B), registrando seus limites (2A e B) e os limites sul e norte do Batólito de Catolé do Rocha (1A e B). Já a norte, fora dos limites do batólito, é possível identificar fortes amplitudes, que sugere a presença de diques básicos mesozoicos da formação Basalto Ceará-Mirim (3A), comuns nessa área. Esses diques possuem poucas porções mapeadas pela geologia em toda a Província Borborema, porém conta com assinaturas magnéticas em toda sua extensão (Figura 10). Eles apresentam direção preferencial E-W na porção leste da província e, conforme se afastam na direção oeste, convergem levemente para a direção NE-SW, possivelmente seguindo a estruturação da própria província.

O perfil *EF*, que intercepta a anomalia de Bom Sucesso (Figura 24 C), registra os limites laterais do Batólito de Catolé do Rocha (1A e B), da anomalia a sul (2.2A e B) e das assinaturas do corpo central (2.1A e B). Na região norte do perfil, identifica-se forte assinatura, talvez associada aos diques mesozoicos originados pela abertura do Atlântico.

Figura 24 – Perfis de TGA das anomalias de Maniçoba (A), Brejo dos Santos (B) e Bom Sucesso (C).



Nota: As linhas verticais cheias azuis indicam os limites das anomalias; as linhas cheias em preto as zonas de cisalhamento; as tracejadas o Batólito de Catolé do Rocha; e as verticais cheias verdes representam possíveis diques da Formação Rio Ceará Mirim.

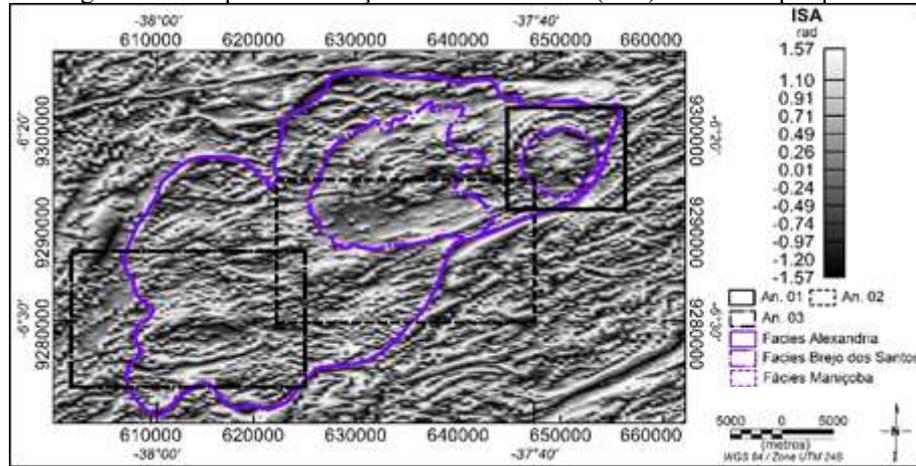
Fonte: O Autor (2019).

Para a análise dos lineamentos magnéticos foi utilizado o filtro de realce Inclinação do Sinal Analítico (ISA). O ISA resalta os limites laterais do Batólito de Catolé do Rocha, onde é possível correlacionar as principais estruturas magnéticas com o batólito. Indica também os limites tanto da anomalia de Maniçoba e seu padrão circular, quanto das anomalias Brejo dos Santos e Bom Sucesso (Figura 25). Assim sugere-se que as estruturas NE-SW (N60E), verificadas, principalmente a SE e NE, fora dos domínios do batólito, controlaram o alojamento do magma formador do batólito. Dada a expressividade magnética deste conjunto de anomalias, de direções NE-SW, mesma apresentada pelo Batólito de Catolé do Rocha e também de suas anomalias internas, fato que torna a hipótese de controle estrutural altamente plausível (Figura 26).

As estruturas NE-SW a noroeste do batólito indicam ser anteriores ao seu alojamento (Figura 26). Isso é explicado por não apresentarem estruturas subordinadas com a mesma orientação em seu interior. Também é identificado que os possíveis diques sejam posteriores as estruturas N30E a noroeste, sugerindo a possibilidade de reativação destas estruturas após o

alojamento do dique. Esta hipótese pode ser explicada pela pequena mudança de direção nas assinaturas em algumas intersecções das estruturas NE-SW e o dique ENE-WSW.

Figura 25 – Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) da área de pesquisa.

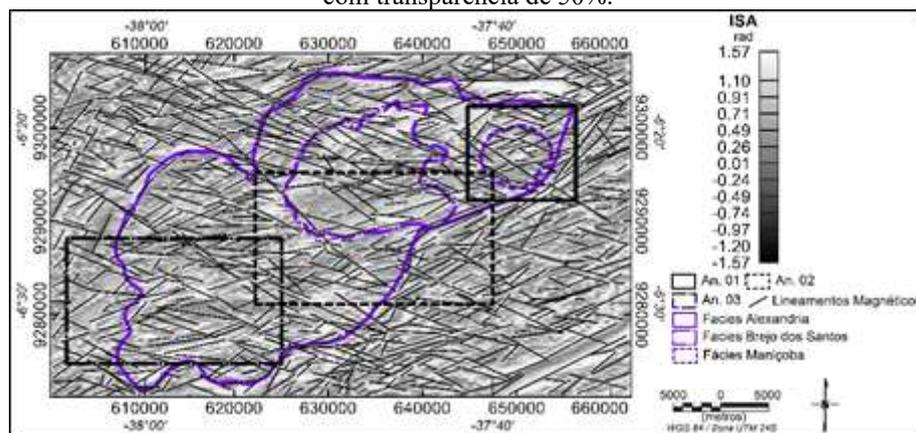


Nota: Os quadrados em vermelho representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão. Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

Ocorrem também estruturas magnéticas com direção NW-SE, que aparentam ser relativamente mais jovens que as outras, pois interferem tanto nas estruturas N60E quanto nas N30E. As estruturas NE-SW possuem influência em praticamente toda a área e também no lineamento magnético interpretado como dique da formação Basalto Rio Ceará Mirim.

Figura 26 – Mapa da interpretação dos principais lineamentos magnéticos da inclinação do sinal analítico (ISA) com transparência de 50%.



Nota: Os quadrados em vermelho representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão.

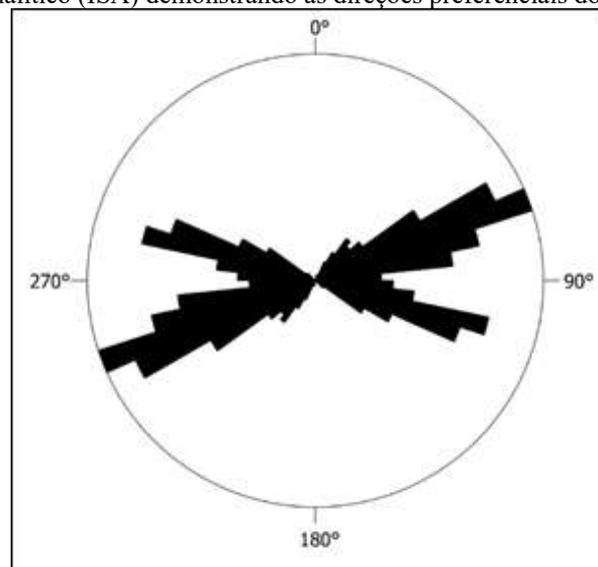
Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

As estruturas relativamente mais antigas da área são as estruturas NE-SW (N60E a noroeste e N30E a sudeste), não sendo possível identificar a mais antiga pela geofísica, pois não existe truncamento aparente entre elas. As estruturas NW-SE são mais jovens em relação as NE-SW, externas ao batólito. Esta interpretação é sugerida por conta das orientações preferenciais que os lineamentos magnéticos NE-SW apresentam, também sendo truncados pelas estruturas magnéticas de direção NW-SE. Estas estruturas são interpretadas, relativamente, como as mais jovens para a área de pesquisa, permitindo sua expressão ser verificada ainda na topografia da área (Figura 15B).

O diagrama de roseta dos lineamentos interpretados suporta os eventos e relações descritos, predominando direções preferenciais NE-SW para a região. Um segundo conjunto com direção preferencial NW-SE, alguns de menor expressão ENE-WSW e ainda E-W, sugerindo sistema de cisalhamento regional segundo o modelo de Riedel, onde a direção NE-SW seria de extensão e a direção NW-SE de compressão (Figura 27).

Figura 27 – Diagrama de roseta obtido com base na interpretação de 933 lineamentos magnéticos obtidos a partir da inclinação do sinal analítico (ISA) demonstrando as direções preferenciais dos lineamentos magnéticos.



Fonte: O Autor (2019).

A ISA é uma técnica difundida na interpretação geofísica para avaliação da transição do relevo magnético de áreas complexas. Porém, esta técnica pode ocasionar uma sobrenormalização dos dados magnéticos, realçando os comprimentos de onda de maior intensidade e impedindo avaliar todos os os comprimentos de onda significativos da área de estudo. Com o intuito de contornar a sobrenormalização, foi utilizado o *dynamic range compression* (DRC). Esta técnica visa avaliar somente comprimentos de onda de interesse e, assim, sugerir de forma qualitativa a profundidade das fontes magnéticas. Com o DRC,

menores comprimentos de onda podem ser interpretados como estruturas mais rasas do banco de dados investigado ao passo que as mais profundas são representadas pelos maiores comprimentos de onda.

A técnica foi aplicada sobre o campo magnético anômalo (CMA) e os comprimentos de onda foram definidos em relação ao tamanho das células da malha interpolada para avaliar comprimentos de onda de ordens diferentes (Figuras 28A, 28B, 28C, 28D, 28E e 28F). No caso apresentado, foi possível fazer a correspondência das estruturas mais rasas com feições de maior amplitude do sinal magnético (Figura 22). Estruturas de maior profundidade foram associadas a menores amplitudes magnéticas por suas conseqüentes maiores distâncias entre fontes geradoras das anomalias e o receptor.

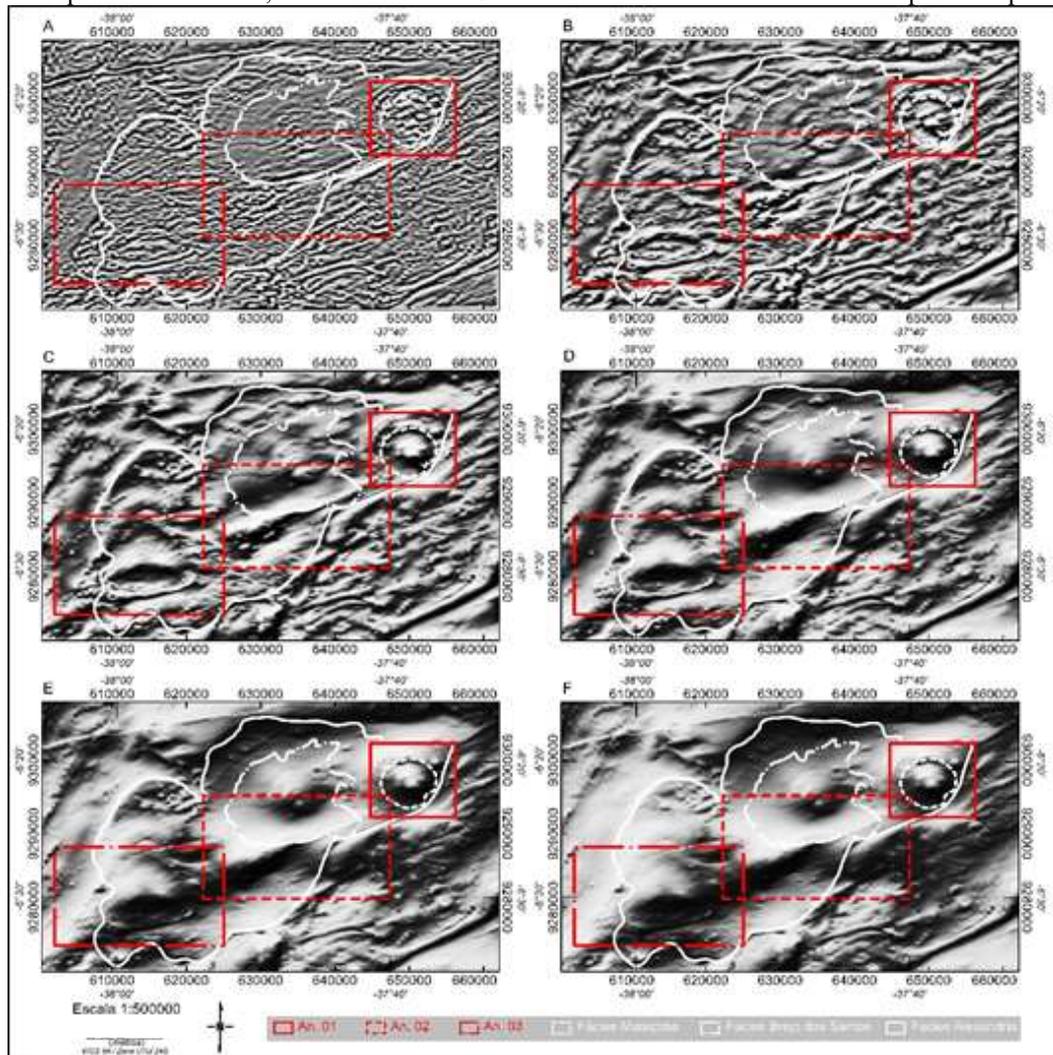
Na figura 28A nota-se que a maioria das assinaturas magnéticas representam os lineamentos magnéticos interpretados através da ISA (Figura 25), sugerindo que estas assinaturas são mais superficiais. Isso ocorre porque a maioria conta com assinatura no menor comprimento de onda, e conforme o comprimento de onda aumenta, estas desaparecem.

Nota-se que as estruturas NE-SW são superficiais (Figura 28A) (N30E e N60E) e possuem reflexos profundos (Figura 28F). Os limites laterais do Batólito de Catolé do Rocha também são realçados, assim como a estrutura interpretada anteriormente como dique básico e as intrusões no sul da área (granito e metagranito). Essas expressões são identificadas tanto nos menores comprimentos (Figura 28A) quanto nos maiores (Figura 28F), fato que sugere que estas estruturas são profundas com reflexos superficiais.

Das anomalias selecionadas para a inversão, apenas a anomalia de Maniçoba e Brejo dos Santos apresentam contraste desde o menor comprimento de onda até o maior (Figuras. 28A e F), podendo ser caracterizadas como mais superficiais. Já a anomalia de Bom Sucesso apresenta contraste a partir de comprimentos de onda maiores (Figura 28B).

Com relação as fácies do batólito, tanto a fácies Maniçoba quanto a Brejo dos Santos possuem assinaturas em todos os comprimentos de onda. Este fato pode sugerir que tais fácies foram geradas a partir de pulsos magmáticos específicos, com a Fácies Maniçoba mais superficial e a fácies Brejo dos Santos mais profundas (Figura 28 C). Já a fácies Alexandria conta com a mesma assinatura em toda sua extensão.

Figura 28 – Mapas do dynamic range compression (DRC) demonstrando a variação espacial das componentes dos comprimentos de onda, onde células de 125 metros de lado foram utilizadas como ponto de partida.



Nota: As filtragens com o DRC utilizaram operadores de 10, 25, 50, 100, 200 e 1000 células, respectivamente. Com 10 células (1250 m) (A); 25 células (3125 m) (B); 50 células (6250 m) (C); 100 células (12500 m) (D); 200 células (25000 m) (E); 1000 células (125000 m) (F). Os quadrados em branco representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão. Os contornos em branco representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

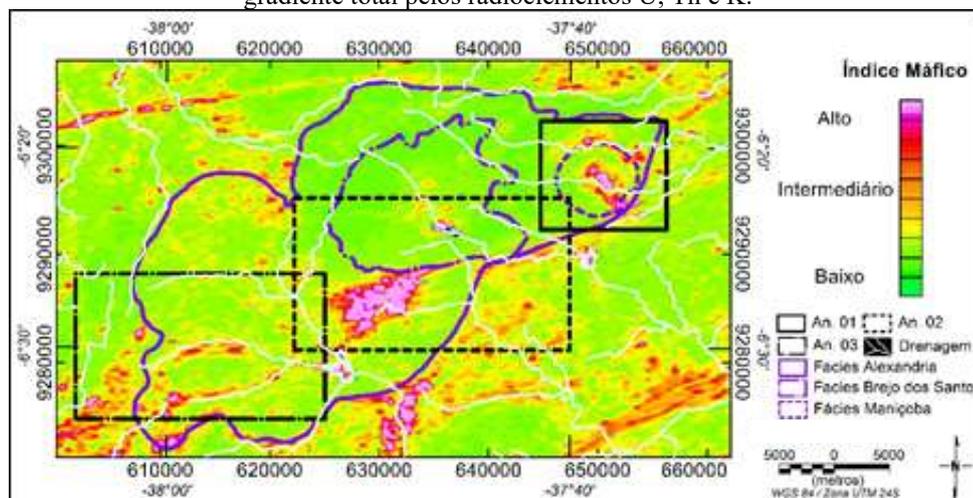
As estruturas mapeadas com o DRC a partir de 25 células (Figura 28B), sugerem a maior profundidade dos sinais, sendo possível verificar que tanto o batólito, quanto as anomalias selecionadas para o detalhamento em seu interior possuem assinaturas de maior profundidade, sendo identificáveis no maior comprimento de onda utilizado (Figura 28F).

Integrando a magnetometria e a radiometria, foi gerado o mapa de índice máfico (IM) (Eq. 15), que visa realçar a ocorrência de unidades intermediárias a máficas em terrenos predominantemente felsícos. (Figura 29). É possível notar tanto no mapa ternário (Figura 15A) quanto nos mapas magnéticos a presença de um dique básico da formação Basalto Ceará Mirim a norte do batólito. No mapa de IM é possível notar essa assinatura, como um

lineamento de valor alto, mais pronunciado em sua porção WSW e decrescente em direção a ENE. Na região sul, externa ao batólito, é notada uma anomalia de alto IM que também possui assinaturas magnéticas e radiométricas, existindo a possibilidade da ocorrência de corpo máfico também nessa região.

Na área interna ao batólito, as anomalias magnéticas selecionadas têm assinaturas de alto a intermediário do IM. Para a anomalia de Maniçoba, como nos dados radiométricos, são determinadas duas assinaturas de IM. A primeira, localizada a sul, apresenta padrão de valores altos de IM (Figura 29) enquanto que a segunda, localizada a norte no limite geológico inferido para a fácies Maniçoba, possui valores intermediários do IM que aparenta englobar a região NE do corpo circular a sul. A anomalia de Brejo dos Santos é bem definida com altos valores do IM. Já a anomalia de Bom Sucesso conta com as menores assinaturas do IM da área (Figura 29), porém ainda é perceptível seu padrão alongado E-W com valores intermediários a norte e baixos a sul.

Figura 29 – Mapa do índice máfico (IM) demonstrando a ocorrência de rochas intermediárias a máficas em terreno félsico livre da contribuição de coberturas sedimentares através da normalização da amplitude do gradiente total pelos radioelementos U, Th e K.



Nota: Os quadrados em preto representam as anomalias magnéticas Maniçoba (An. 01), Brejo dos Santos (An. 02) e Bom Sucesso (An. 03) selecionadas para inversão.

Os contornos em roxo representam as fácies Maniçoba, Brejo dos Santos e Alexandria do Batólito de Catolé do Rocha.

Fonte: O Autor (2019).

Não existe nenhuma assinatura do IM perceptível nas fácies do batólito. Cabe salientar, que para a fácies Alexandria, ocorrem comportamentos contrastantes entre as regiões nordeste e sudoeste no batólito. Na região nordeste é possível notar um comportamento de baixo IM, sem muitas interferências intermediárias a altas, ao passo que esse padrão muda na região sudoeste, demonstrando um padrão ainda baixo para a maior parte, porém com interferências numerosas de intermediário a alto do IM. Este último padrão

sugere que a fácies Alexandria apresenta alguma variação interna, já que os resultados geofísicos indicam contrastes em todas as técnicas apresentadas.

### 5.3 INTERPRETAÇÃO CONJUNTA: ANOMALIAS SELECIONADAS

As três anomalias internas ao Batólito de Catolé do Rocha foram janeladas para destacar as assinaturas magnéticas das estruturas da área de estudo (delimitadas pelos retângulos pretos nas Figuras 21 a 29). Este procedimento contou com técnicas de realce e processamento empregadas para a área geral, e outras técnicas de caracterização que fornecem melhores resultados para áreas menores que apresentam pouca influência regional.

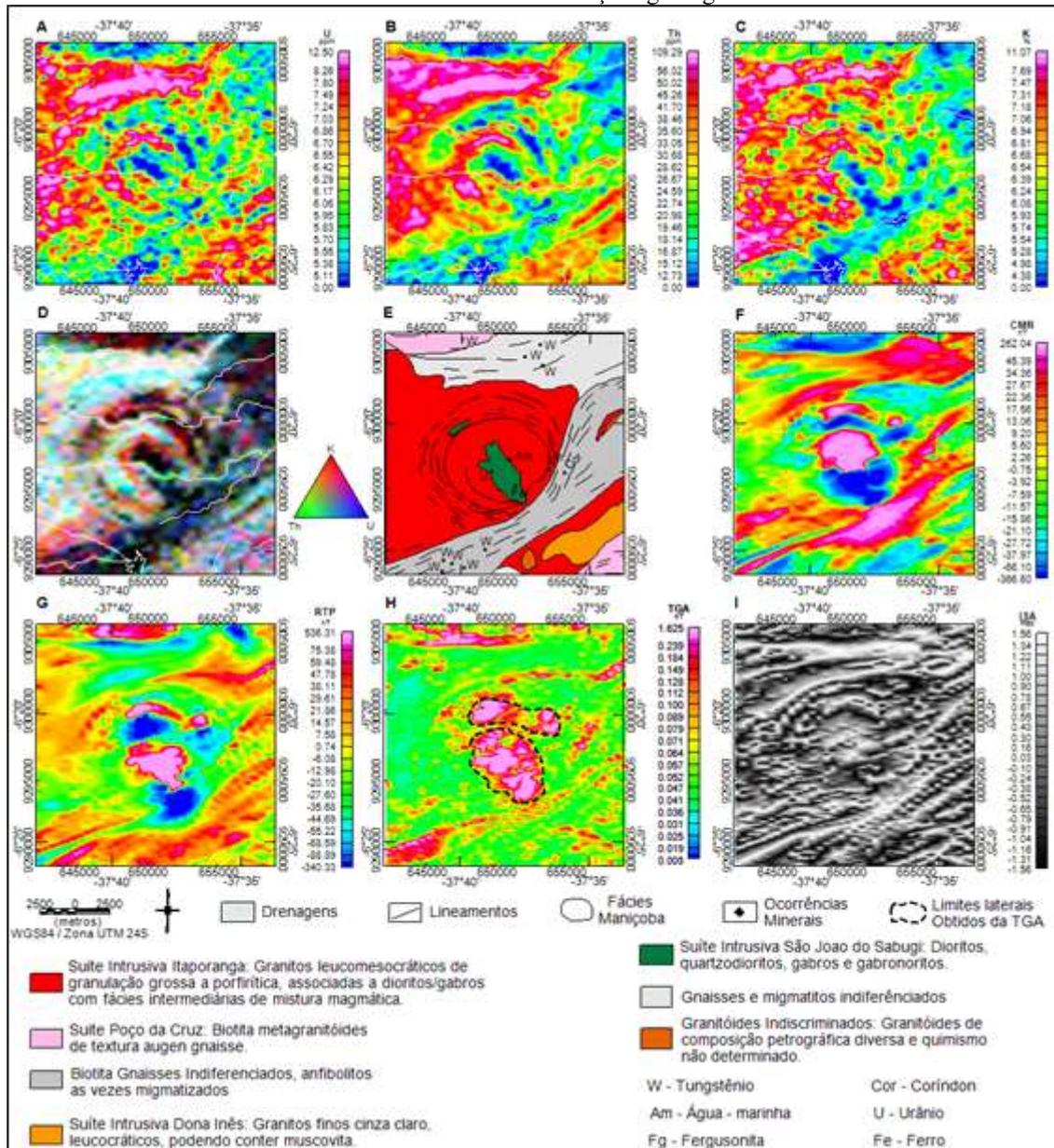
#### 5.3.1 Anomalia de Maniçoba

A anomalia de Maniçoba apresenta padrão circular nos dados radiométricos, magnéticos e no mapa geológico (Figura 30). O padrão concêntrico das concentrações de U, Th e K e na visualização ternária, possui maiores detalhes na anomalia de Maniçoba (Figura 30D) que no mapa global do projeto (Figura 15A) em virtude de não sofrer influência dos máximos globais da área a qual faz parte.

Nos dados magnéticos é possível verificar que a anomalia de Maniçoba possui dois corpos anômalos, porém o RTP evidencia o comportamento das anomalias de forma mais adequada. Com a análise do RTP, da TGA e ISA foram interpretados os limites laterais dos corpos anômalos, onde é possível inferir a continuidade do corpo alongado.

Nota-se que as principais ocorrências minerais da área se encontram no interior da fácies Maniçoba (Figura 30E). Nos limites do corpo máfico/intermediário ocorrem urânio, ferro e água-marinha, enquanto nos limites da região delimitada pela fácies Maniçoba ocorre fergusonita. Essas ocorrências são características de corpos pegmatíticos da fase final de intrusões, podendo existir correlação com o processo gerador da suíte máfica/intermediária e da fácies Maniçoba.

Figura 30 – Mapa da anomalia de Maniçoba, demonstrando a variação dos dados geofísicos e do mapa geológico da área bem como as convenções geológicas.

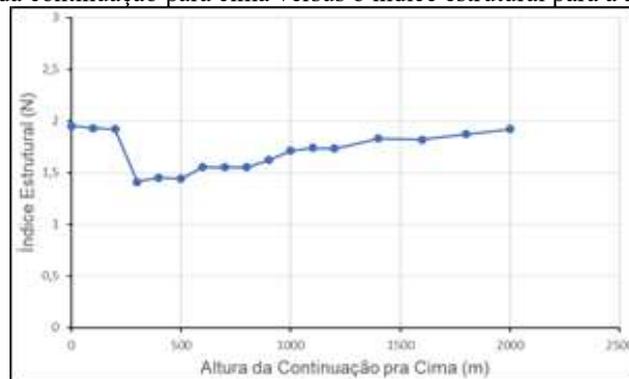


Nota: A distribuição da concentração de urânio (U) em ppm (A), tório (Th) em ppm (B) e de potássio (K) em % (C). A imagem ternária (D), o mapa geológico (E), o campo magnético residual (CMR) (F), a redução ao pólo (RTP) (G), a amplitude do gradiente total (TGA) (H) e a inclinação do sinal analítico (ISA) (I).

Fonte: O Autor (2019).

Apesar das assinaturas geofísicas sugerirem que os corpos anômalos são aflorantes, efetuou-se a deconvolução de Euler aliada a estimativa indireta de índice estrutural, para verificar tal fato e oferecer maiores informações acerca da anomalia de Maniçoba. Foram efetuadas continuações para cima de 0 a 2000 metros (de 100 em 100 metros), onde foi obtido o índice estrutural magnético de 2 (Figura 31). Este valor representa que o corpo geológico é caracterizado por duas dimensões e pode ser interpretado como modelo geológico com formatos de cilindro horizontal ou *pipe* (Tabela 1).

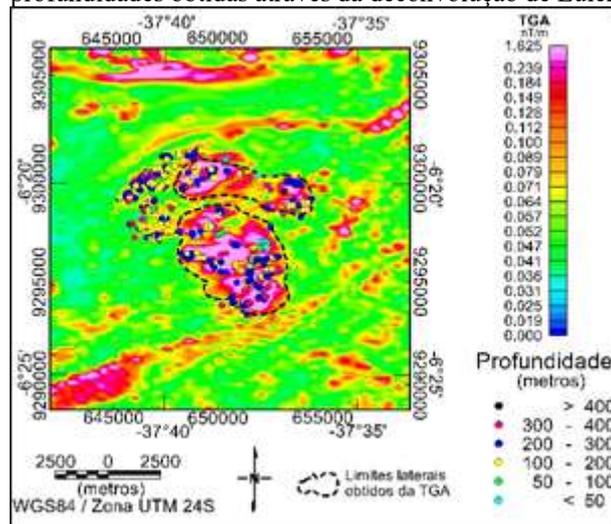
Figura 31 – Gráfico da continuação para cima versus o índice estrutural para a anomalia de Maniçoba.



Fonte: O Autor (2019).

O valor do índice estrutural obtido neste procedimento foi utilizado na deconvolução de Euler padrão de forma a contribuir com vínculos mais sólidos para a caracterização da profundidade das fontes magnéticas (Figura 32). A média de profundidade dos valores obtidos com a deconvolução de Euler foi de aproximadamente 220 metros para os dois corpos anômalos. Quando separados, o corpo a sul apresenta média menor de profundidade, variando de aflorantes em alguns pontos até uma média de 213 metros. Já o corpo a norte possui soluções que o caracterizam como aflorante, porém a média de profundidade é bem maior, variando em torno de 230 metros. Com a análise apenas da TGA, sugere-se que este corpo poderia ser separado em dois menores, porém a deconvolução de Euler sugere que existe uma ligação entre ambos, tornando o corpo único com ligação em subsuperfície.

Figura 32 – Mapa da TGA para a anomalia magnética de Maniçoba com os respectivos resultados das profundidades obtidas através da deconvolução de Euler.



Fonte: O Autor (2019).

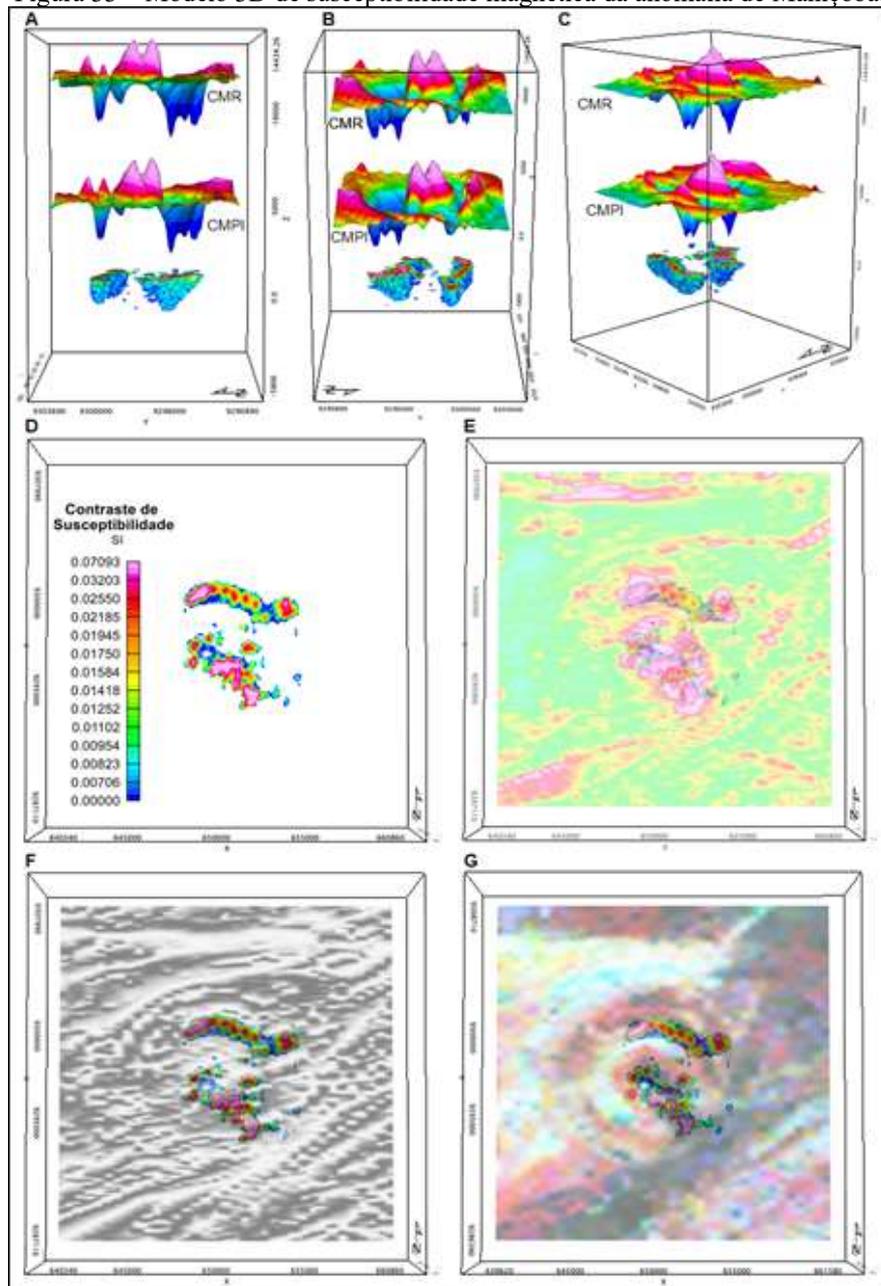
As soluções indicam também valores de profundidade maiores em direção a oeste, onde o TGA não recuperou resultados expressivos. Este fato sugere que os corpos em questão possuem extensão pouco maior do que aqueles interpretados somente com os limites laterais da TGA e podem se aprofundar em direção a oeste.

O modelo obtido a partir da inversão 3D da anomalia de Maniçoba resultou em dois corpos, assim como nos mapas de realce. Um deles maior, de formato aproximadamente circular, e outro menor, alongado que circunda o corpo maior a nordeste (Figura 33). Estes corpos apresentam o contraste de susceptibilidade que varia de 0,0070 (SI) em seus limites laterais atingindo 0,0709 (SI) no centro do corpo maior (Figura 33D).

É possível notar que o corpo anômalo possui limites laterais muito próximos daqueles obtidos a partir do TGA (Figura 33E), demonstrando boa aproximação com a geologia. A comparação dos corpos modelados com a ISA (Figura 33F) demonstra que as estruturas podem ter particionado o corpo anômalo maior após sua intrusão. No entanto, a inversão não consegue recuperar essa resposta. Mesmo assim, é possível que o formato do corpo e orientação sejam uma resposta de pequenos movimentos das estruturas geológicas, proporcionando o formato apontado.

A comparação entre os modelos e o mapa ternário (Figura 33G) mostra que as assinaturas de baixo de U, Th e K estão associados com a influência dos corpos anômalos da área e que estes são representados pelos dioritos mapeados pela geologia (Figura 30E). As regiões entre essas assinaturas e nas bordas dos corpos têm auréolas com altas concentrações de K, o que pode ser indicativo de alteração hidrotermal. As assinaturas magnéticas e radiométricas junto com a geologia indicam potencialidade de mineralizações nesta área, visto a existência de ocorrências minerais e as assinaturas geofísicas.

Figura 33 – Modelo 3D de susceptibilidade magnética da anomalia de Maniçoba.



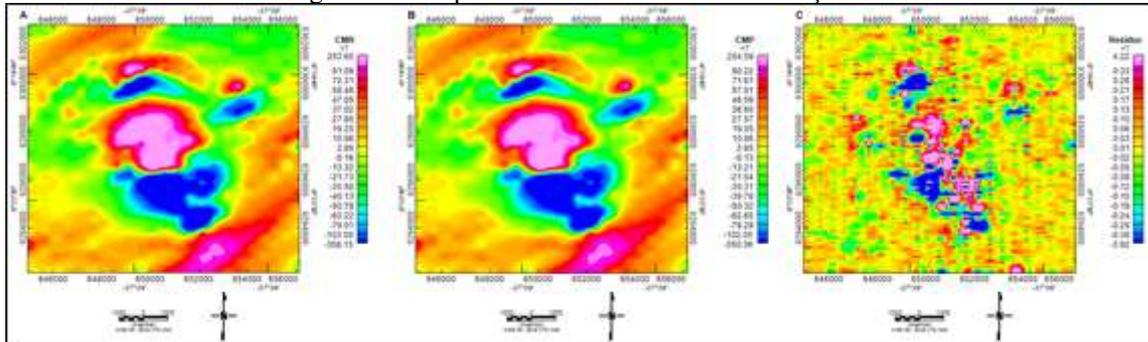
Nota: Visto de oeste (A), em perspectiva do leste (B), em perspectiva do noroeste (C). Nestas visualizações estão inclusas superfícies do campo magnético residual (CMR) e do campo magnético predito na inversão (CMPI). Uma seção horizontal com os valores do contraste de susceptibilidade (D) e comparações do modelo com o TGA (E), ISA (F) e mapa ternário (G).

Fonte: O Autor (2019).

O resíduo entre o Campo Magnético Predito (CMP) e o campo magnético residual (CMR) indica baixos valores, amplitude de 8,14 nT (Figura 34), o que comprova que o modelo gerado a partir da inversão dos dados magnéticos são satisfatórios. O CMR da anomalia de Maniçoba possui 611,63 nT de amplitude, ao passo que a amplitude do CMP recuperado através da inversão compreende 604,95 nT. Nota-se que os valores do resíduo

para a anomalia de Maniçoba são inferiores a 2%, o que demonstra que a inversão, foi numericamente precisa e resultou no melhor modelo geofísico.

Figura 34 – Mapa do CMR da anomalia de Maniçoba.



Nota: Anomalia de Maniçoba (A); campo magnético predito na inversão (B); resíduo obtido a partir da diferença dos dados reais e os dados obtidos na inversão (C).

Fonte: O Autor (2019).

### 5.3.2 Anomalia de Brejo dos Santos

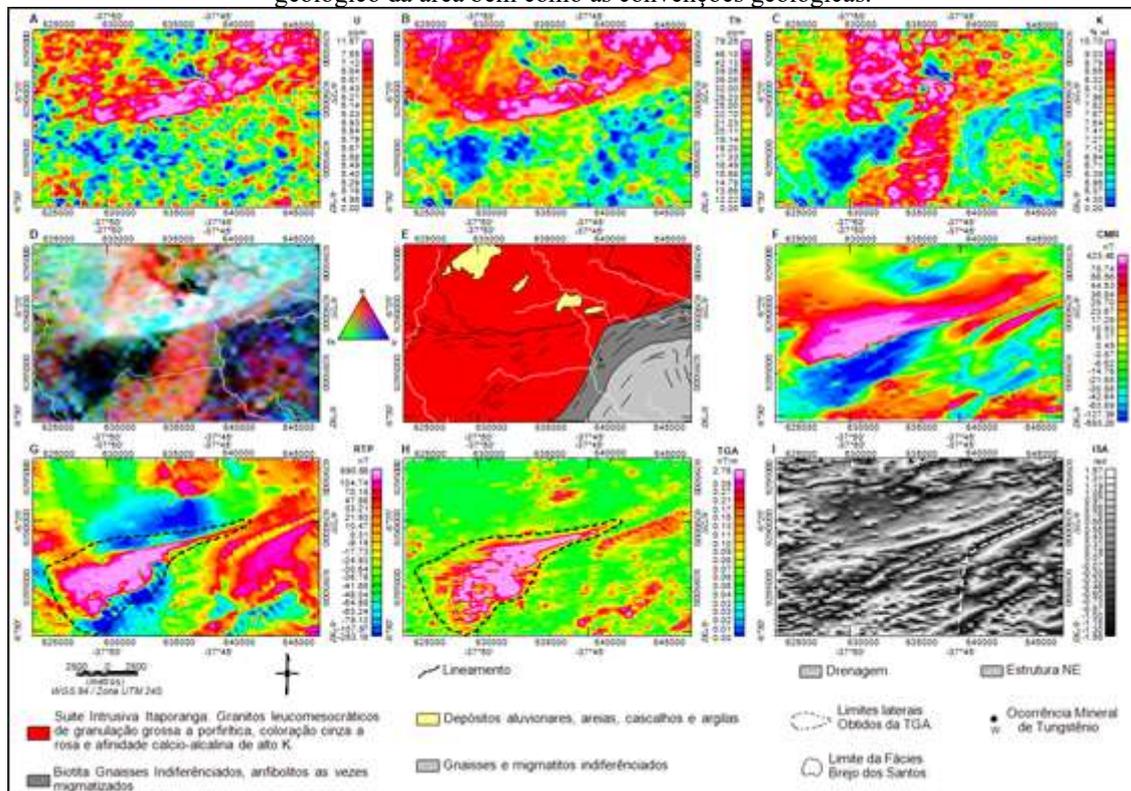
A anomalia de Brejo dos Santos apresenta padrão alongado segundo a direção NE-SW, sendo mais pronunciada sua largura a sudoeste e adelgaça conforme se projeta para nordeste até desaparecer. Este padrão é verificado tanto nos dados magnéticos quanto nos dados radiométricos (Figura 35). As assinaturas dos dados radiométricos demonstram baixas concentrações para os elementos de U, Th e K (Figuras. 35A, B e C) sugerindo um corpo geológico intermediário a máfico, com reflexos superficiais (Figura 35D).

Verificam-se as altas concentrações de U e Th a nordeste da anomalia de Brejo dos Santos, principalmente em seus limites. No centro da fácies Brejo dos Santos identificam-se alta concentrações de K, que perdem intensidade conforme se afastam da região. A faixa a sudeste da anomalia de Brejo dos Santos conta com baixa concentração de U, Th e K intercalada com contagens intermediárias de U, possivelmente associada à formação Jucurutu. Conforme se aproxima do extremo sudeste da área, as contagens de K passam a ser maiores, podendo ser causadas pelos gnaisses e migmatitos mapeados na região. O mapa geológico da área (Figura 35E) não possui menção ao corpo geológico causador da anomalia de Brejo dos Santos, mesmo com os reflexos superficiais apontados pelo método radiométrico.

O CMR da anomalia de Brejo dos Santos tem amplitude de 1016,68 nT, possui um padrão estirado, sendo mais amplo a sudoeste e diminui de intensidade a nordeste até desaparecer por completo (Figura 35F). A redução ao polo desta anomalia magnética (Figura 35G) pela técnica MAXIMIN (FEDI et al., 1994) resultou nos valores de  $-28,0^\circ$  e  $-19,5^\circ$  para inclinação e declinação magnética, respectivamente. Contrariando os valores obtidos direto do

campo magnético de referência IGRF, os quais foram -20.54 e -21.93 para inclinação e declinação magnética, respectivamente.

Figura 35 – Mapa da anomalia de Brejo dos Santos, demonstrando a variação dos dados geofísicos e do mapa geológico da área bem como as convenções geológicas.



Nota: A distribuição da concentração de urânio (U) em ppm (A), tório (Th) em ppm (B) e de potássio (K) em % (C). A imagem ternária (D), o mapa geológico (E), o campo magnético residual (CMR) (F), a redução ao pólo (RTP) (G), a amplitude do gradiente total (TGA) (H) e a inclinação do sinal analítico (ISA) com linha em branco tracejada a estrutura NE-SW com vergência para sul a partir de sua metade (I).

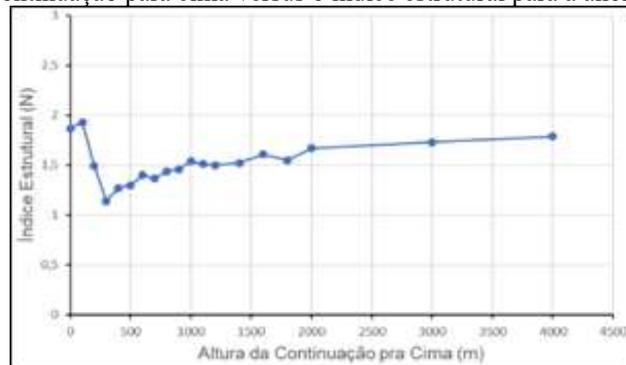
Fonte: O Autor (2019).

A TGA resultou num corpo magnético único (Figura 35H), os limites laterais são coerentes com os do RTP (Figura 35G). A ISA mostra a estruturação a qual a anomalia de Brejo dos Santos foi submetida (Figura 35I) e indica que se deu de acordo com as estruturas NE-SW da área.

Os mapas de TGA, ISA e ternário sugerem, que o alojamento ocorreu de nordeste para sudoeste, em virtude do padrão observado no extremo sudoeste do corpo, onde são verificados padrões semicirculares e a maior largura do corpo. Ainda pode ser sugerido que a estrutura na região sudeste e sua vergência para sul (Figura 35I – linha branca tracejada) é resultado do alojamento do corpo máfico interno ao Batólito de Catolé do Rocha. A estrutura apresenta direção NE-SW, e quando se aproxima da zona de influência da intrusão, ocorre a mudança de direção para sul devido a acomodação de espaço entre os corpos intrusivos.

Buscando obter a profundidade da anomalia de Brejo dos Santos efetuou-se o procedimento de deconvolução de Euler. O procedimento resultou valores com tendência a se aproximar do índice estrutural magnético de 2 (Figura 36), indicando que o corpo geológico possui duas dimensões, e pode ser caracterizado por cilindro horizontal ou *pipe* (Tabela 1).

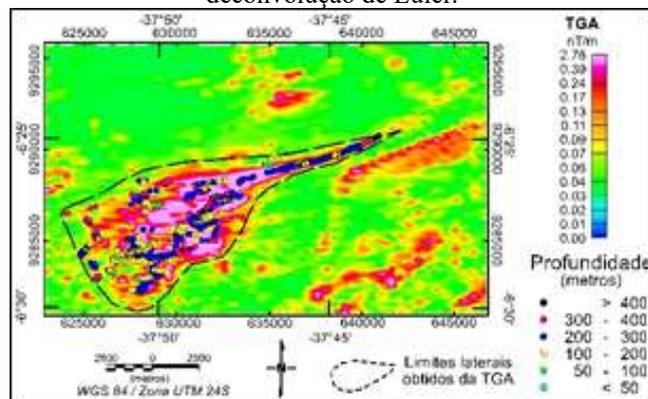
Figura 36 – Gráfico da continuação para cima versus o índice estrutural para a anomalia de Brejo dos Santos.



Fonte: O Autor (2019).

Os resultados obtidos a partir da deconvolução de Euler padrão com índice estrutural magnético de 2 (Figura 37) mostram uma grande variação de profundidade. O mapa apresenta pontos com profundidades menores que 60 metros (consideradas aflorantes) até com mais de 400 metros, com média de 232 m. É possível notar que nos limites a nordeste da anomalia de Brejo dos Santos, região onde ocorre o adelgaçamento do corpo, as profundidades vão desde aflorantes e se aprofundam progressivamente em direção a nordeste. A região nordeste da anomalia apresenta profundidades progressivamente maiores, com média de 250 m, fato que também ocorre a oeste, porém com profundidades entre 100 e 200 m.

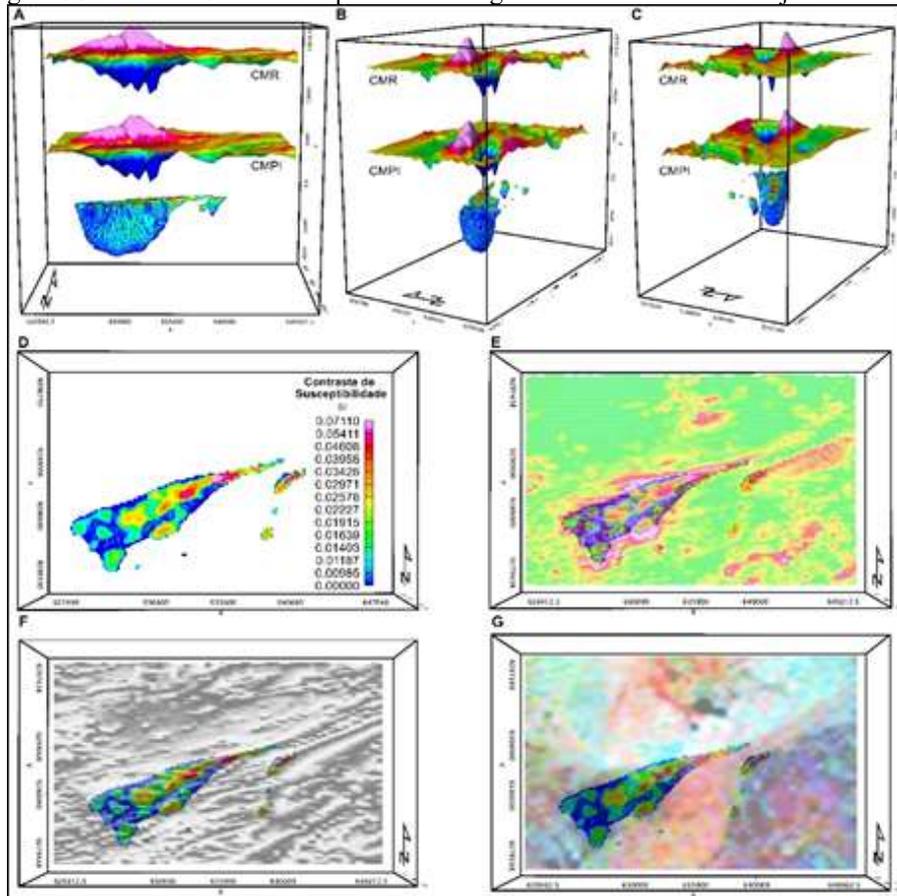
Figura 37 – Mapa da Amplitude da Derivada Total (TGA) bem como os limites laterais interpretados da anomalia magnética de Brejo dos Santos com os respectivos resultados das profundidades obtidas através da deconvolução de Euler.



Fonte: O Autor (2019).

Os valores de profundidade obtidos dos dados magnetométricos, juntamente com as assinaturas radiométricas, demonstram que a maior parte do corpo geológico causador da anomalia magnética de Brejo dos Santos se encontra aflorante ou possui auréola de influência superficial. Esta hipótese dá-se em virtude da não identificação em mapeamentos geológicos regionais, tendo em vista as assinaturas geofísicas, que indicam que o corpo geológico de tamanho expressivo é aflorante. Com a profundidade da fonte magnética anômalas definida, realizou-se a inversão 3D da anomalia magnética de Brejo dos Santos (Figura 38).

Figura 38 – Modelo 3D de susceptibilidade magnética da anomalia de Brejo dos Santos.



Nota: Visto de sul (A), em perspectiva de sudoeste (B), em perspectiva de nordeste (C). Nestas visualizações estão inclusas superfícies do campo magnético residual (CMR) e do campo magnético previsto na inversão (CMPI). Uma seção horizontal com os valores do contraste de susceptibilidade (D) e comparações do modelo com o TGA (E), ISA (F) e mapa ternário (G).

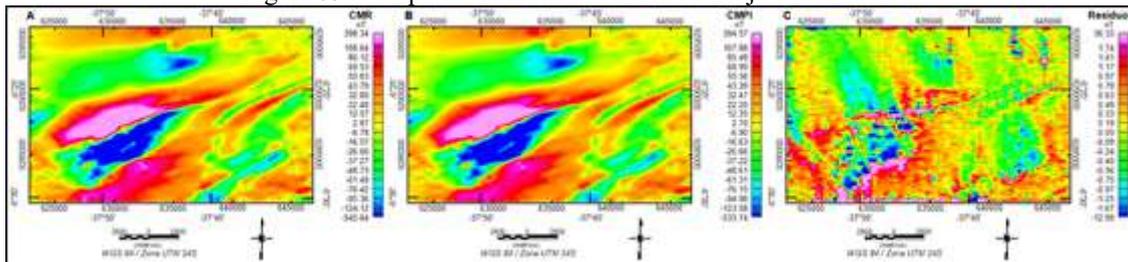
Fonte: O Autor (2019).

O modelo possui contraste de susceptibilidade que varia de 0,0090 (SI), em sua região mais externa recuperada, até 0,0711 (SI) na porção centro-nordeste do corpo (Figura 38D). Os limites laterais são concordantes com aqueles obtidos a partir da visualização ternária dos radioelementos (Figura 38G), principalmente na região sudoeste do corpo, onde possui a região de maior largura. A ISA possibilita a visualização de uma estrutura expressiva com

orientação NE-SW, que ocorre em toda a área (Figura 38F). Este fato pode sugerir que tal estruturação propiciou a fraqueza crustal necessária para ascensão e alojamento do magma do corpo anômalo. Através da comparação do o modelo 3D do corpo recuperado na inversão com os limites laterais interpretados a partir da TGA (Figura 38E), é possível notar que ambos são bastante semelhantes.

O mapa de CMR (Figura 39A) apresenta amplitude máxima de 943,98 nT, enquanto a amplitude máxima do CMPI (Figura 39B) é de 928,31 nT, possuindo uma diferença de aproximadamente 1,66 %. Com a análise do resíduo (Figura 39C), é possível constatar ainda que a diferença obtida entre CMR e CMPI, teve amplitude de 49,32 nT, em termos percentuais, sendo inferior a 6%, o que demonstra a qualidade do modelo obtido pela caracterização 3D. Estes valores são ainda menores quando considerado apenas a área definida pelos limites laterais interpretados pela TGA (Figura 38E).

Figura 39 – Mapa do CMR da anomalia de Brejo dos Santos.



Nota: Anomalia de Brejo dos Santos (A), o campo magnético predito na inversão (B) e o resíduo obtido a partir da diferença dos dados reais e os dados obtidos na inversão (C).

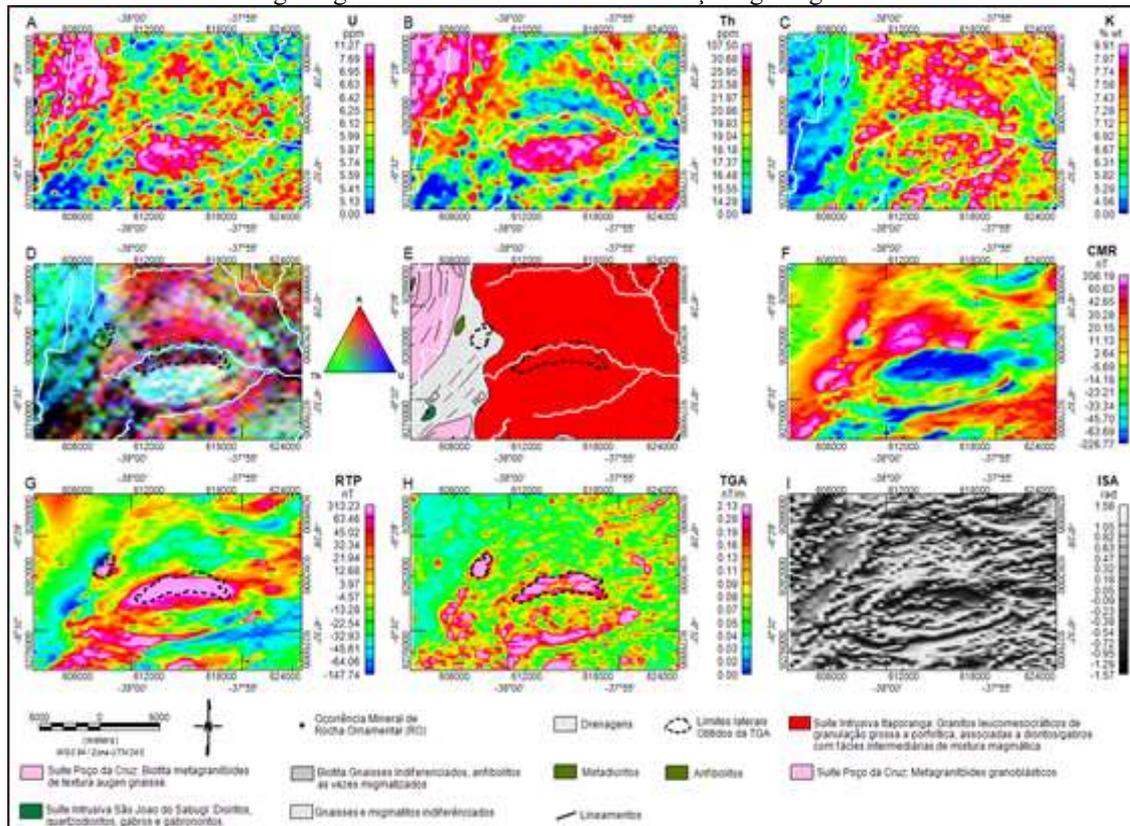
Fonte: O Autor (2019).

### 5.3.3 Anomalia de Bom Sucesso

A anomalia de Bom Sucesso está localizada na porção extremo sudoeste, interna ao Batólito de Catolé do Rocha. Possui assinaturas alongadas segundo a direção E-W, com altas contagens dos três radioelementos em sua parte sul e mais baixas contagens ao norte. Este comportamento sugere a existência de um corpo máfico a intermediário aflorante ou com reflexos superficiais de seu alojamento, assim como o observado nas anomalias de Maniçoba e Brejo dos Santos (Figura 40).

As emissões de U, Th e K da anomalia de Bom Sucesso indicam altas concentrações na região sul, distribuídas segundo a direção E-W e com baixas contagens a norte (Figuras. 40A, B e C). A visualização ternária demonstra que este corpo alongado está limitado por estruturas a norte e a sul com baixas contagens (Figura 40D). É possível identificar as altas concentrações de K com o mesmo padrão alongado da anomalia de Bom Sucesso, tanto a sul quanto a norte do corpo.

Figura 40 – Mapa da anomalia de Bom Sucesso, demonstrando a variação dos dados geofísicos e do mapa geológico da área bem como as convenções geológicas.



Nota: A distribuição da concentração de urânio (U) em ppm (A), tório (Th) em ppm (B) e de potássio (K) em % (C). A imagem ternária (D), o mapa geológico (E), o campo magnético residual (CMR) (F), a redução ao pólo (RTP) (G), a amplitude do gradiente total (TGA) (H) e a inclinação do sinal analítico (ISA) (I).

Fonte: O Autor (2019).

A assinatura de baixa concentração dos três radioelementos está encaixada exatamente no contorno da assinatura de alta concentração de U, Th e K, e é possível verificar estruturas que limitam essas assinaturas através das drenagens que tendem a se encaixar em regiões de cisalhamentos/falhas. O mapa geológico da área não faz menção a corpos geológicos ou cisalhamentos/falhas nesta região. Isso indica que podem não existir em superfície (Figura 40E) ou que pela escala do mapa, não tenham sido mapeadas, uma vez que suas assinaturas radiométricas são reconhecidamente superficiais.

Os dados magnetométricos da anomalia de Bom Sucesso apresentam amplitude de 534,96 nT (Figura 40F), com a mesma distribuição retratada pelos dados radiométricos. Apresenta anomalias a noroeste e a sul do corpo, onde as anomalias a oeste sugerem ser os limites externos ao Batólito de Catolé do Rocha e, as ao sul, estruturas dentro do próprio batólito. A anomalia magnética a noroeste tem forte assinatura, se destacando na região em que se encontra. Esta anomalia está localizada nos limites entre o batólito e a sua encaixante, em uma possível zona de cisalhamento NE-SW, truncada pelo batólito e interpretada a partir

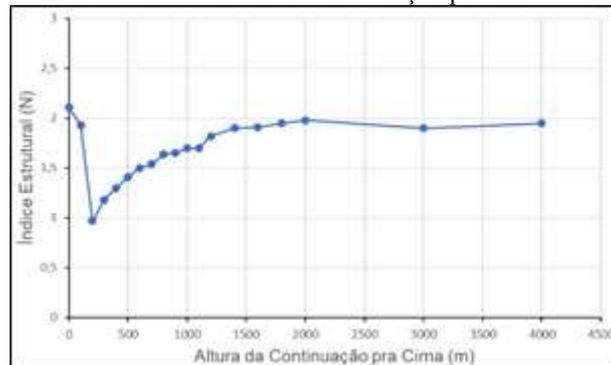
das assinaturas geofísicas. Essa região pode ser sugerida como área de interesse exploratório para minerais associados a pegmatitos principalmente.

A RTP efetuada pela técnica MAXIMIN obteve valores de  $-17,15^\circ$  para inclinação magnética e  $-18,95^\circ$  para a declinação magnética (Figura 40G). Esses valores se aproximam dos obtidos do campo magnético de referência IGRF de  $-20,53^\circ$  e  $-21,94^\circ$  para a inclinação e declinação magnética, respectivamente. Salienta-se que o corpo anômalo a noroeste, mesmo com características normais (Figura 40F), quando efetuada a RTP resulta de uma anomalia com polarização normal (Figura 40F) para uma anomalia com polarização reversa (Figura 40G). Este fato implica em presença de magnetização remanente e, conseqüentemente, que os corpos intrusivos da anomalia de Bom Sucesso foram alojados em épocas diferentes.

A TGA possibilitou a caracterização dos limites laterais tanto da anomalia de Bom Sucesso, quanto das estruturas a sul do corpo e a de direção NE-SW externa ao batólito (Figura 40H). Definiram-se os limites laterais da anomalia localizada a noroeste da anomalia de Bom Sucesso, que apresenta orientação NE-SW, o mesmo da estrutura identificada na região externa ao batólito. A ISA demonstra a variação do relevo magnético para a anomalia de Bom Sucesso, com a ocorrência da estrutura de direção N30E e estruturas as quais o corpo causador da anomalia magnética está sujeito (Figura 40I). A sul, o padrão semicircular se inicia nas estruturas NE-SW e termina em uma estrutura NW-SE a leste do corpo. O corpo causador da anomalia de Bom Sucesso indica influência das estruturas de direção NE-SW.

Para a obtenção da profundidade das fontes magnéticas é necessário o conhecimento do índice estrutural magnético através da deconvolução de Euler localizada (Figura 41). O valor obtido foi de 2, o que representa um corpo magnético com duas dimensões (Tabela 1).

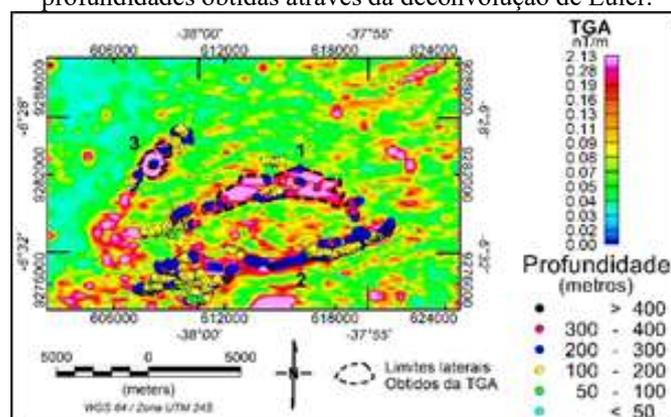
Figura 41 – Gráfico da continuação pra cima versus o índice estrutural para a anomalia de Bom Sucesso, demonstrando o comportamento do índice estrutural, obtido pela deconvolução de Euler localizada, com o aumento da altura da continuação pra cima.



Fonte: O Autor (2019).

A deconvolução de Euler padrão com índice estrutural magnético 2 (Figura 42) demonstrou que o corpo anômalo 3, possui profundidades que variam de 100 a 300 metros. Este corpo segue uma direção NE-SW, o que indica que está encaixado na estrutura de mesma direção e no limite lateral do Batólito de Catolé do Rocha. Este corpo possui profundidade média de 195 metros. A estrutura mapeada a sul, corpo anômalo 2, com baixo dos três radioelementos e forte amplitude magnética, possui variação de profundidade de 100 a 300 metros, com média de 200 metros. Já o corpo anômalo de Bom Sucesso, corpo anômalo 1, apresenta uma grande variação de profundidades começando em 100 até ultrapassar 300 metros. Este corpo aumenta progressivamente de profundidade de E para W, apresentando menores profundidades a E que a W.

Figura 42 – Mapa da TGA para a anomalia magnética de Bom Sucesso com os respectivos resultados das profundidades obtidas através da deconvolução de Euler.



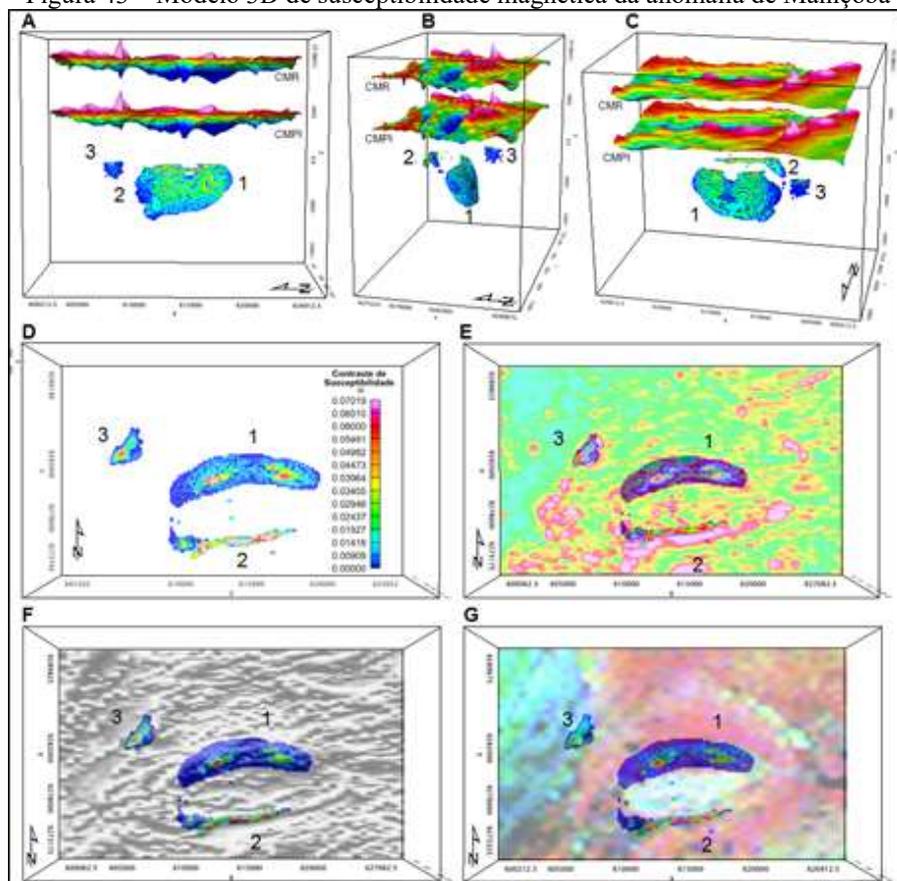
Fonte: O Autor (2019).

Os resultados das soluções da deconvolução de Euler padrão possibilitaram a obtenção de profundidades médias, para os dois corpos anômalos e para a estrutura a sul, acima 100 metros. Porém, através da interpretação dos dados radiométricos é possível notar que existem influências superficiais geradas pelos corpos anômalos, tendo em vista a pequena

profundidade de ação do método. Com este fato é possível sugerir que, apesar dos corpos estarem alojados em maiores profundidades, a interação de possíveis fluidos com as rochas encaixantes geraram reflexos superficiais caracterizados pela variação dos radioelementos.

Após a determinação das profundidades pela deconvolução de Euler padrão, foram gerados os modelos 3D das anomalias magnéticas, por inversão (Figura 43). Os corpos modelados da anomalia de Bom Sucesso possuem contraste de susceptibilidade que variam de 0,0091 a 0,0702 (SI) (Figura 43D). Os valores máximos e mínimos são obtidos para o centro das anomalias e seus limites laterais respectivamente.

Figura 43 – Modelo 3D de susceptibilidade magnética da anomalia de Maniçoba



Nota: Visto de leste(A), em perspectiva de sudoeste (B), em perspectiva de noroeste (C). Nestas visualizações estão inclusas superfícies do campo magnético residual (CMR) e do campo magnético predito na inversão (CMPI). Uma seção horizontal do modelo com os valores do contraste de susceptibilidade (D) e comparações do modelo com o TGA (E), ISA (F) e mapa ternário (G). Os números 1, 2 e 3 representam a anomalias de Bom Sucesso, a sul e a Noroeste, respectivamente.

Fonte: O Autor (2019).

O corpo anômalo 1 da anomalia de Bom Sucesso (Figura 43), localizado no centro da área, possui formato alongado segundo a direção ENE-WSW e possui maior contraste de susceptibilidade a sudoeste. Em seu centro apresenta variação maior da profundidade, possuindo o corpo um formato de cela. Esta característica foi identificada pelas soluções de

Euler, que demonstraram progressivo aumento da profundidade na região central, sendo replicada pela inversão dos dados magnéticos.

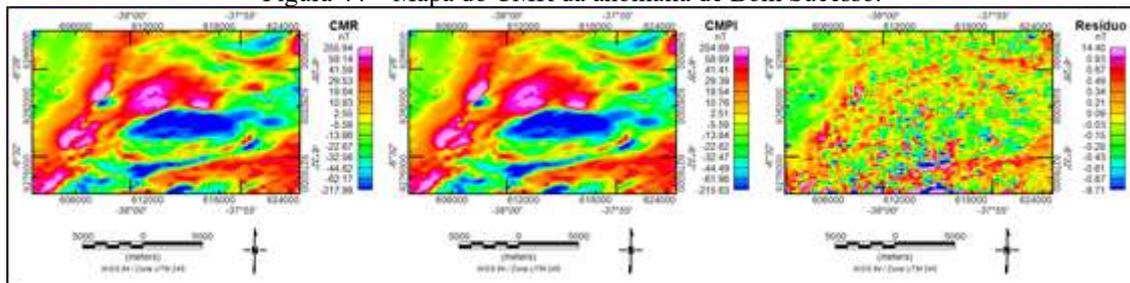
O corpo anômalo 2 demonstra a mesma estruturação ENE-WSW do corpo principal, porém os maiores contrastes de susceptibilidade estão localizados próximos ao seu topo. A similaridade de direções entre os corpos anômalos 1 e 2 sugere que ambos foram gerados segundo os mesmos padrões de esforços. O corpo anômalo 3, como já apontado nas soluções de Euler, possui formato alongado segundo a direção NE-SW. O contraste de susceptibilidade atinge seu máximo na região sudoeste do corpo, representado por 0,0702 (SI).

Os limites laterais dos três corpos anômalos e a TGA se justapõem de forma precisa, indicando a qualidade da caracterização (Figura 43E). A ISA que possibilita a identificação do padrão de magnetização das rochas as quais os corpos estão submetidos indicou que os corpos anômalos 1 e 2 se encaixam segundo o mesmo padrão de estruturas de direção ENE-WSW (Figura 43F). Já a anomalia 3 está subordinada as estruturas NE-SW com duas direções distintas, N30E e N60E, e se localiza nos limites externos do Batólito de Catolé do Rocha.

A comparação entre os três corpos anômalos e o mapa ternário sugere variações nas litologias dos corpos anômalos (Figura 43G). Os corpos anômalos 1 e 2, limitam a norte e a sul a assinatura de alto dos três radioelementos, respectivamente. Sendo mais pronunciada para a anomalia 2 que para anomalia 1. Através das soluções de Euler, foi verificado que as fontes dos sinais magnéticos não são aflorantes, indicando que reflexos do alojamento de tais corpos anômalos são registrados em superfície através da possível ação de hidrotermalismo, como evidenciado pelo parâmetro F (Figura 19). O corpo anômalo 3 se encontra alojado no complexo Caicó (Figura 3), nos limites laterais do Batólito de Catolé do Rocha e com estruturação NE-SW. Sua assinatura radiométrica contém mais altas contagens de Th a leste do corpo e altas contagens de Th e U a oeste, ao passo que decresce em direção ao seu centro, com mais baixas contagens (cor marrom a preto) (Figura 43G).

O CMR para a anomalia de Bom Sucesso conta com amplitude de 473,93 nT, ao passo que o CMPI possui amplitude de 470,52 nT (Figura 44), o que resulta em uma diferença percentual de 0,72%. O resíduo possui amplitude de 24,11, representando menos de 6% das amplitudes do CMR e CMPI.

Figura 44 – Mapa do CMR da anomalia de Bom Sucesso.



Nota: Anomalia de Bom Sucesso (A), o campo magnético predito na inversão (B) e o resíduo obtido a partir da diferença dos dados reais e os dados obtidos na inversão (C).

Fonte: O Autor (2019).

Os modelos obtidos para as anomalias Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso e seus resíduos reproduzem as variações de contraste de susceptibilidade magnética dos corpos anômalos causadores das anomalias magnéticas no interior do Batólito de Catolé do Rocha. Os resíduos forneceram diferenças entre o CMR e o CMPI inferiores a 10%, indicando a qualidade do ajuste da inversão. Os valores dos contrastes de susceptibilidades obtidos para as três áreas analisadas são similares. Os valores obtidos para a anomalia de Bom Sucesso variaram de 0,0091 a 0,0702 (SI), já para anomalia de Brejo dos Santos teve variação de 0,0089 a 0,0711 (SI) e pôr fim a anomalia de Maniçoba contou com os valores de 0,0070 a 0,0709 (SI). A partir da análise dos resultados obtidos para anomalia de Maniçoba, e a correlação entre os valores do contraste de susceptibilidade e a geologia da área, que registra uma suite máfica/intermediária caracterizada principalmente por dioritos (MEDEIROS et al., 2008), é possível sugerir que os outros corpos anômalos do interior do batólito, tenham a mesma composição diorítica.

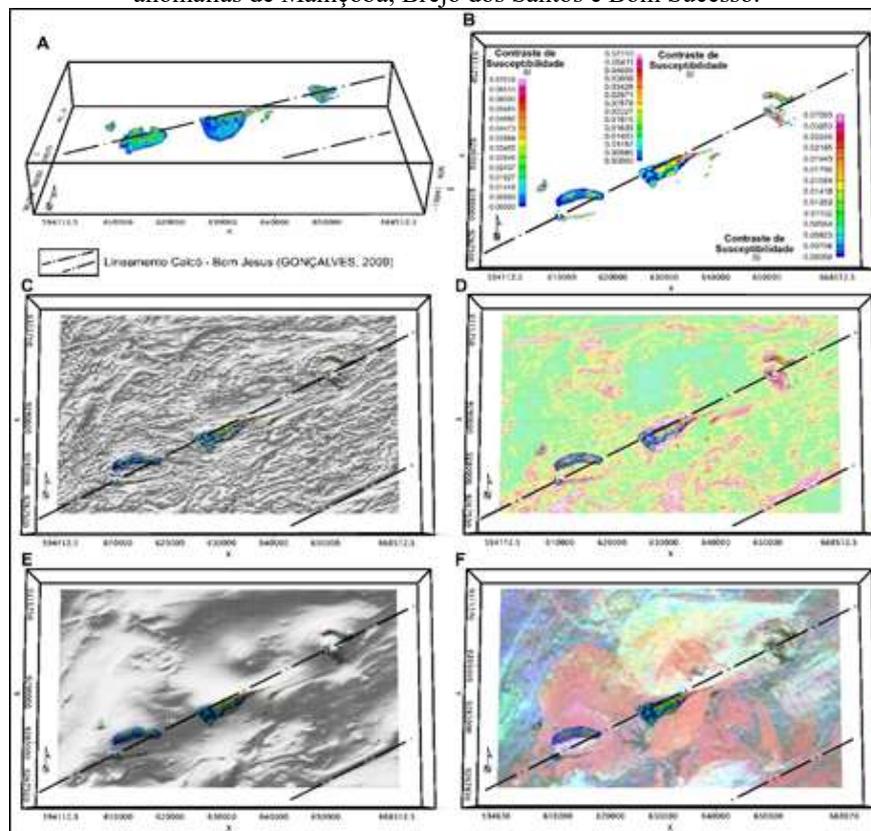
Para visualização de forma mais ampla da área de pesquisa, os corpos anômalos recuperados a partir da inversão dos dados magnéticos são apresentados de forma conjunta (Figura 45). Os corpos anômalos estão orientados segundo a direção NE-SW, e guardam o mesmo sentido da orientação do lineamento magnético Caicó-Bom Jesus (GONÇALVES, 2009). Este lineamento conta com duas regiões de ação, uma localizada dentro dos domínios do batólito e outra localizada a sudeste. A estrutura a sudeste é concordante com as assinaturas radiométricas e magnéticas nesta região. Tal estruturação sugere que tanto o batólito quanto os corpos anômalos interpretados possam ter aproveitado tal zona de fraqueza para sua migração e alojamento. Isso é referenciado pelos dados geoquímicos que sugerem que a suite máfica/intermediária não são co-magmáticas aos granitóides das fácies do batólito.

Em um contexto geral duas hipóteses são possíveis com relação aos dados geofísicos e geológicos da área. A primeira representa apenas a proposição acerca dos corpos causadores

das anomalias magnéticas interpretadas e a segunda pode ser uma interpretação possível tanto para o Batólito de Catolé do Rocha quanto suas anomalias intrusivas.

A primeira hipótese levantada sugere que as anomalias de Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso são intrusões que ocorreram em virtude do lineamento magnético interpretado por GONÇALVES (2009), posteriores, portanto, ao alojamento do Batólito de Catolé do Rocha. Em virtude da zona de fraqueza gerada na área, seria possível a migração e alojamento desses corpos máficos/intermediários em porções mais rasas seguindo o alinhamento NE-SW observado para as demais estruturas na região.

Figura 45 – Mapa com os modelos 3D obtidos a partir da caracterização 3D dos parâmetros físicos das anomalias de Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso.



Nota: Em A e B os corpos anômalos apresentados em perspectiva N-S e em planta com os respectivos contrastes de susceptibilidade e o lineamento Caicó - Bom Jesus (LCBJ) (GONÇALVES, 2009) representado em tracejado preto. Em C, D, E e F a visualização comparativa em planta dos corpos anômalos com a Inclinação do Sinal Analítico (ISA), Amplitude do Gradiente Total (TGA), o Dynamic Range Compression (DRC) e a visualização ternária dos radioelementos U, Th e K respectivamente.

Fonte: O Autor (2019).

A segunda, se baseia no modelo proposto por LIMA et al. (2017), onde o magma para a formação do batólito pode ter sido gerado por uma mistura de fontes, evoluindo a partir de fusão parcial da crosta inferior devido a um *underplating* basáltico. Estes autores argumentam que o estágio compressivo da orogenia Brasileira/Pan Africana, possibilitou a evolução de

magmas a partir de fusão parcial da crosta inferior devido ao *underplating* favorecendo a gênese do Plúton de Curral de Cima por mistura de fontes e sua evolução a partir de cristalização fracionada. Esta hipótese, segundo os autores, é plausível e explicaria os valores altos das assinaturas de  $\epsilon\text{Nd}$  daquele corpo.

A segunda hipótese sugerida nesse trabalho considera que esse cenário pode ter contribuído também para a formação do Batólito de Catolé do Rocha e as anomalias detalhadas neste trabalho, pela mistura de magmas diferentes para a gênese do batólito e sua evolução a partir de cristalização fracionada.

As hipóteses corroboram em parte para a geração das anomalias interpretadas no Batólito de Catolé do Rocha. Para Medeiros et al. (2008), a suíte máfica/intermediária pode ter como magma parental fontes mantélicas (manto anômalo) e os granitóides das fácies ter origem crustal (base de crosta). Os autores salientam os processos de mistura dos granitóides com as rochas dioríticas, deixando em aberto uma contribuição mantélica para ambas.

No presente estado de arte, nenhuma hipótese pode ser seguramente descartada, sendo necessários estudos geoquímicos complementares para o entendimento mais amplo dos processos de gênese do Batólito de Catolé do Rocha e de sua suíte máfica/intermediária.

## 6 CONCLUSÕES

A partir da interpretação dos dados geofísicos, magnetometria e gamaespectrometria, foi possível avaliar o Batólito de Catolé do Rocha. Seus limites laterais foram identificados com a interpretação dos filtros de realce magnético (TGA, ISA e DRC – Figuras 23 a 28) e a partir dos mapas radiométricos (U, Th, K, ternário, razões e anomalias – Figuras 12 a 20).

Foi possível investigar as fácies do Batólito de Catolé do Rocha a partir dos produtos geofísicos. Dentre elas podem ser citados os mapas dos elementos U, Th e K (Figuras 12 a 14), ternário (Figura 15A) e suas razões (Figuras 16 a 18), correlacionando as fácies Brejo dos Santos e Maniçoba com produtos radiométricos.

Este processo indicou que apresentam assinaturas em mapas de contagens individuais, razões, U anômalo, K anômalo e ternário. A fácies Alexandria possui dois comportamentos contrastantes, altas contagens radiométricas de U e Th a nordeste e baixas a sudoeste. Também é possível verificar o antagonismo entre Th e K a partir de sua razão, onde a região a nordeste do batólito conta com alta razão e baixa a sudoeste.

Foi possível analisar a ocorrência de estruturas profundas com a análise da técnica DRC (Figura 28). Estruturações NE-SW bem marcadas ocorrem nos maiores comprimentos de onda investigados. Isso possibilita a verificação da ocorrência de anomalias no centro das fácies Maniçoba desde o menor comprimento de onda. Possibilita também a visualização em profundidade de todas as anomalias magnéticas investigadas e suas orientações NE-SW.

A partir da integração geofísica com a geologia do Batólito de Catolé do Rocha, podem ser sugeridas duas áreas principais para exploração mineral de elementos e pedras semipreciosas associadas a pegmatitos (U, Th, Li, água-marinha, coríndon, dentre outros).

A primeira entre os corpos dioríticos da fácies Maniçoba em virtude das ocorrências minerais, assinaturas radiométricas e magnéticas que caracterizaram a possibilidade de hidrotermalismo e pequenos depósitos minerais associados a pegmatitos. A segunda na região compreendida pelo corpo anômalo 3 da anomalia de Bom Sucesso, localizado na região de contato entre o batólito e os lineamentos magnéticos no Complexo Caicó.

Por fim, podem ser sugeridas duas hipóteses para a gênese e evolução tanto do Batólito de Catolé do Rocha quanto das anomalias internas detalhadas no trabalho. A primeira indica apenas a formação dos corpos anômalo de Maniçoba, Brejo dos Santos e Bom Sucesso segundo a direção NE-SW, aproveitando a zona de fraqueza do Lineamento Caicó-Bom Jesus.

A segunda hipótese, por sua vez, apresenta uma formação sin-magmática do batólito e dos corpos anômalos interiores por processos de *underplating* basáltico. Salienta-se que ambas as hipóteses carecem de trabalhos geoquímicos mais detalhados para sua corroboração ou refutação.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Para a comprovação ou descarte das áreas propostas como exploratórias, faz-se necessário o mapeamento geológico-geofísico de detalhe nessas áreas. A descoberta de pegmatitos mineralizados nas duas áreas propostas pode fornecer importantes receitas aos municípios e a macrorregião onde estão inseridas. Com relação aos dados geoquímicos, é necessária uma melhor amostragem tendo em vista o pequeno número de amostras do Batólito de Catolé do Rocha. Este fato é apoiado pelas assinaturas radiométricas interpretadas no interior do batólito que possuem grande variação. Com tal procedimento pode ser possível a distinção de fontes para a geração tanto da suíte máfica/intermediária quanto dos granitóides do Batólito de Catolé do Rocha.

Com base nas interpretações geofísicas do batólito, podem ainda ser destacadas diferenças entre os limites identificados no mapa geológico e as assinaturas geofísicas. Isso demonstra que, principalmente na região nordeste do corpo, as assinaturas geofísicas mostram que o batólito se projeta além do que foi mapeado. Para a verificação de tal diferença recomenda-se que seja efetuado um mapeamento geológico de detalhe.

Com tais ações é possível agregar ainda mais informações com relação a gênese do Batólito de Catolé do Rocha, a evolução que as fácies do batólito sofreram e possibilitaria uma melhora na definição dos limites laterais tanto das fácies quanto do batólito. Também seria possível a caracterização da suíte máfica/intermediária do interior do batólito, podendo fornecer importantes informações para o melhoramento do conhecimento geológico da região e a relação entre as gêneses da suíte do Batólito de Catolé do Rocha. E, por fim, a determinação de ocorrências minerais nas regiões sugeridas neste projeto de pesquisa, as quais podem fornecer importantes receitas para a região.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian Structural Provinces: An Introduction Earth Science Reviews, **Earth-Science Reviews**, v.17, n.1-1, p.1-29, 1981.
- \_\_\_\_\_. Províncias Estruturais Brasileiras. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. **Anais** [...]. Campina Grande, 1977.
- ALSOP, S.; WATTS, M. Sources from a Somerset Village: A Model for Informal Learning About Radiation and Radioactivity. **Science Education**, v.81, p.633-650, 1997.
- ANGELIM, L.A.A. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte – Escala 1:500.000**. Serviço Geológico do Brasil. Recife: CPRM, 2006.
- ARTHAUD, M. H.; CABY, R.; FUCK, R.A.; DANTAS, E.L.; PARENTE, C.V. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and Its Correlation With Nigeria, NW Africa. *In*: PANKHURST, R. J., TROUW, R. A. J., BRITO NEVES, B. B., DE WIT, M. J. (Org.). **West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region**. London, Geological Society of London, v. 294, 2008, p. 49-67.
- BARANOV, V. A New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps: Pseudo-Gravimetric Anomalies. **Geophysics**, v.22, n.2, p. 359-383, 1957.
- BERTRAND, J.M.; JARDIM DE SÁ, E.F. Where are the Eburnian Transamazonian Collisional Belts? **Canadian Journal of Earth Sciences**, v.27, p.1382-1393, 1990.
- BIONDI, J. C. **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- BLAKELY, R. J. **Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications**. Cambridge University Press, 1996.
- BOYLE, R. W. Geochemical Prospecting for Thorium and Uranium Deposits. **Developments in Economic Geology**, v.16, p.71-78, 1982.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J. Post Rhyacian/Early Cryogenian of Northeast of South America: Contribution for the Unraveling a Multifarious History. *In*: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 4., 2006, Punta de Leste. **Anais** [...]. Punta del Leste: Facultad de Agronomía/Facultad de Ciencias, Universidad de la República/ UNESCO, p. 61-64, 2006.
- BRITO NEVES, B. B. A Propósito da Evolução Litoestratigráfica do Precambriano Superior do Nordeste. **Jornal de Mineralogia**, n. 7, p. 19-27, 1978.
- BRITO NEVES, B.B.; CAMPOS NETO, M.C.; VAN SCHMUS, W.R.; FERNANDES, T.M.G.; SOUZA, S.L. O Terreno Alto Moxotó no Leste da Paraíba (Maciço Caldas Brandão). **Revista Brasileira Geociências**, n. 31, p. 185-194, 2001.
- BRITO NEVES, B.B.; SANTOS, E.J.; VAN SCHMUS, W. R. The Tectonic History of the Borborema Province, Northeast Brazil. *In*: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ

FILHO, A.; CAMPOS, D.A. (Org.). **Tectonic Evolution of the South American**. Rio de Janeiro: 38th Inter. Geol. Cong, 2000, p. 151–182.

BRITO NEVES, B.B.; VAN SCHMUS, W.R.; FETTER, A. Northwestern Africa-North-Eastern Brazil. Major Tectonic Links and Correlation Problems, **Journal of African Earth Sciences**, v.34, n3-4, p. 275–278, 2002.

CABY, R. Precambrian Terranes of Benin Nigeria and Northeast Brazil and the Late Proterozoic South Atlantic Fit. **Geological Society of America**, v.230, p.145-158, 1989.

CABY, R.; BERTRAND, J.M.; BLACK, R. Pan-African Ocean Closure and Continental Collision in the Hoggar-Iforas Segment, Central Sahara. **Developments in Precambrian Geology**, v.5, p.407–434, 1981.

CAMPBELL, W. H. **Introduction to Geomagnetic Fields**. 2. ed. Cambridge University Press, 2003.

CAMPOS, B.C.S.; VILALVA, F.C.J.; NASCIMENTO, M.A.L.; GALINDO, A.C. Crystallization Conditions of Porphyritic High-K Calc-Alkaline Granitoids in the Extreme Northeastern Borborema Province, NE Brazil, and Geodynamic Implications. **Journal of South American Earth Sciences**, v.70, p.224-236, 2016.

CORDANI, R.; SHUKOWSKY, W. Magnetização Remanescente: Um Parâmetro Crucial para a Interpretação e Modelamento de Anomalias Magnéticas em Território Brasileiro. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.27, n.4, p. 659-667, 2009.

DARNLEY, A.G. Some Notes on the Importance of Airborne Gamma-Ray Spectrometry in International Geochemical Mapping. **Journal of Geochemical Exploration**, v.49, n.1-2, p.201-212, 1993.

DICKSON, B.L.; SCOTT, K.M. Interpretation of Aerial Gamma-Ray Surveys-Adding the Geochemical Factors. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v.17, p.187-200, 1997.

DICKSON, B.L.; CLARK, G.J.; MCGREGOR B.J. Technique for Correcting for Over-Burden Effects in Ground Level Radiometric Surveys of Uranium Ore Bodies. **Geophysics**, v. 44, p. 89–98, 1979.

FEDI, M.; FLORIO, G.; RAPOLLA, A. A Method to Estimate the Total Magnetization Direction from a Distortion Analysis of Magnetic Anomalies. **Geophysical Prospecting**, v. 42, n. 3, p. 261–274, 1994.

FERREIRA, C.A.; SANTOS, E. J.(Org.). **Jaguaribe SE: folha SB.24-Z: estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Rio de Janeiro: CPRM, 2000.

FERREIRA, C. A. **Caicó: folha SB.24-Z-B: estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: CPRM, 1998.

FLORIO, G.; FEDI, M; PAŠTEKA, R. On the Estimation of the Structural Index from Low-Pass Filtered Magnetic Data. **Geophysics**, v. 79, n.6, p.J67– J80, 2014.

FOOTE, R.S. Improvement in Airborne Gamma Radiation Data Analyses for Anomalous Radiation Changes. *In: SYMPOSIUM ON THE USE OF NUCLEAR TECHNIQUES IN THE PROSPECTING AND DEVELOPMENT OF MINERAL RESOURCES*, 1., 1968. Buenos Aires. **Anais** [...]. Buenos Aires. International Atomic Energy Agency, p.187-194, 1968.

FROST, B.R.; SHIVE, P.N. Magnetic Mineralogy of the Lower Continental Crust. **Geophys. Res.**, v.91, p. 6513–6521, 1986.

GNOJEK, I.; PRICHYSTAL, A. A New Zinc Mineralization Detected by Airbone Gamma-Ray Spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia). **Geoexploration**, v. 23, n.4, p. 491-502, 1985.

GONÇALVES, L. C. **Contribuição Geofísica à Análise do Arcabouço Tectônico do Domínio Rio Grande do Norte, Província Borborema – NE-Brasil**. 2009. 100f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

GRANT, F.S.; DODDS, J. **Magmap FFT Processing System Development Notes**. Paterson, Grant and Watson Limited, 1972.

GRASTY, R.L.; HOLMAN, P.B., BLANCHARD, Y.B. Transportable Calibration Pads for Ground and Airborne Gamma-Ray Spectrometers. **Geological Survey of Canada**, v. 90, n. 23, 1991.

GUIMARÃES, I.P.; DA SILVA FILHO, A.F.; ALMEIDA, C.N.; VAN SCHMUS, W.R.; ARAÚJO, J.M.M.; MELO, S.C.; MELO, E.B. Brasiliano (Pan-African) Granitic Magmatism in the Pajeu-Paraíba Belt, Northeast Brazil: An Isotopic and Geochronological Approach. **Precambrian Research**, v. 135, p. 23-53, 2004.

GUIMARÃES, I.P.; VAN SCHMUS, W.R.; BRITO NEVES, B.B.; BITTAR, S.M.B.; SILVA FILHO, A.F.; ARMSTRONG, R. U–Pb Zircon Ages of Orthogneisses and Supracrustal Rocks of the Cariris Velhos Belt: Onset of Neoproterozoic Rifting in the Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, v.192–195, p. 52– 77, 2012.

GUNN P.J. **Interpretation of Airbone Magnetic and Radiometric Surveys**. Course. Canberra: AGSO Australian Geological Survey Organisation, 1998.

HINZE, W. J.; VON FRESE, R. R. B.; SAAD, A. H. **Gravity and Magnetic Exploration. Principles, Practices and Applications**. Cambridge University Press, 2013.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying**. Technical Reports Series. Viena: IAEA, 1991.

\_\_\_\_\_. **Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data**. Viena: IAEA, 2003.

IZA, E. R. H. F.; HORBE, A. M. C.; CASTRO, C. C.; HERRERA, I. L. I. E. Integration of Geochemical and Geophysical Data to Characterize and Map Lateritic Regolith: An Example in the Brazilian Amazon. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v.19, p. 3254–3271, 2018.

JARDIM DE SÁ, E. F. **A Faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o Seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasiliana/Pan-Africana**. 1994. 803f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 1994.

JARDIM DE SÁ, E.F. A Evolução Proterozóica da Província Borborema. *In: GEOLOGICAL SYMPOSIUM OF NORTHEAST BRAZIL*, 11., 1984, Recife. **Anais [...]**. Recife, p. 297–316, 1984.

KOVESI, P. **Phase Preserving Tone Mapping of Non-Photographic High Dynamic Range Images**. Conference. *In: DIGITAL IMAGE COMPUTING TECHNIQUES AND APPLICATIONS (DICTA)*, p. 1-8, 2012.

KOZUCH, M. **Isotopic and Trace Element Geochemistry of Early Neoproterozoic Gneissic and Metavolcanic Rocks in the Cariris Velhos Orogen of the Borborema Province, Brazil and Their Bearing Tectonic Setting**. 2003. 199f. Tese (PhD in Geology). Kansas University. Kansas City, 2003.

LELIÈVRE, P. G.; OLDENBURG, D. W.; PHILLIPS, N. 3D Magnetic inversion for total magnetization in areas with complicated remanence. *In: SEG TECHNICAL PROGRAM EXPANDED ABSTRACTS*, 1., 2006. **Anais [...]**. Society of Exploration Geophysicists, p. 953-957, 2006. Disponível em: <[http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/pubs/papers/Lelievre\\_seg2006abstr.pdf](http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/pubs/papers/Lelievre_seg2006abstr.pdf)>. Acesso em: 30 jan. 2019.

LI, X., Understanding 3D Analytic Signal Amplitude. **Geophysics**, v. 71, n.2, p.13–16, 2006.

LI, Y.; OLDENBURG, D. W. Fast Inversion of Large-Scale Magnetic Data Using Wavelet Transforms and a Logarithmic Barrier Method. **Geophysical Journal International**, v. 152, n.2, p. 251-265. 2003.

\_\_\_\_\_. 3-D inversion of Magnetic Data. **Geophysics**, v. 61, p. 394–408, 1996.

LIMA, J. V., GUIMARÃES, I. D. P., SANTOS, L., AMORIM, J. V. A., FARIAS, D. J. S. Geochemical and Isotopic Characterization of the Granitic Magmatism Along the Remígio-Pocinhos Shear Zone, Borborema Province, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 75, p.116-133, 2017.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2. ed. Cambridge University Press, 2007.

MEDEIROS, V. C. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Souza – SB.24-Z-A Escala 1:250.000**: Nota explicativa. Sistema de Informações Geográficas – SIG. Programa de Geologia do Brasil. Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: CPRM, 2008.

MEDEIROS, V. C.; AMARAL, C. A.; ROCHA, D. E. G. A.; SANTOS, R. B. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Sousa SB.24-X-A. Escala 1:250.000. Estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará**: relatório. Recife: CPRM, 2005.

MEDEIROS, V. C.; GALINDO, A. C.; NASCIMENTO, M. A. L.; FREIRE, A. G. Geologia, Petrografia e Idade do Batólito de Catolé do Rocha (RN-PB), Porção W do Domínio Rio Grande do Norte da Província Borborema. **Revista de Geologia**, v.20, n.2, p. 219-230, 2008.

MILLER, H. G.; SINGH, V. Potential Field Tilt – A New Concept for Location of Potential Field Sources. **Journal of Applied Geophysics**, v.32, p. 213-217, 1994.

MINTY B.R.S. **A Review of Airborne Gamma-Ray Spectrometric Data-Processing Techniques**. Report 255. Canberra: Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, 1988.

\_\_\_\_\_. Fundamentals of Airborne Gamma-Ray Spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v.17, n.2, p. 39-50, 1997.

MINTY, B. R. S.; LUYENDYK, A. P. J.; BRODIE, R. C. Calibration and Data Processing for Airborne Gamma-Ray Spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v.17, n.2, p. 51-62, 1997.

NASCIMENTO, M.A.L; GALINDO, A.C; MEDEIROS, V.A. Ediacaran to Cambrian Magmatic Suites in the Rio Grande do Norte Domain, Extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current Knowledge. *Journal of South American Earth Sciences*, v.58. p. 281-299, 2015.

NEVES, S. P.; MARIANO, G. Província Borborema: Orógeno Acrescionário Ou Intracontinental? **IG Série B**, v. 11, p. 26-37, 2001.

NEVES, S. P.; VAUCHEZ, A. Magma Emplacement and Shear Zone Nucleation and Development in Northeast Brazil (Fazenda Nova and Pernambuco Shear Zones, State of Pernambuco). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, p. 289-298, 1995.

NEVES, S.P. Proterozoic History of the Borborema Province (NE Brazil): Correlations With Neighboring Cratons and Pan-African Belts and Implications for the Evolution of Western Gondwana. **Tectonics**, v.22, n.4, 2003.

OSTROVSKY, E.A. Antagonism of Radioactive Elements in Wallrock Alteration Fields and Its Use in Aero Gamma Spectrometric Prospecting. **International Geology Review**, v. 17, p. 461- 468, 1975.

PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L. **Química na Abordagem Do Cotidiano**. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2003.

PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A.V. New Processing Technologies Applied do Airborne Geophysical Data: Impact on Interpretation. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE EXPLORAÇÃO MINERAL*, 2., 2006, Ouro Preto. **Anais [...]**. Ouro Preto. Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira. 2006.

PIRES, A. C. B. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, n.25, v. 1, p. 61-68, 1995.

REID, A. B.; ALLSOP, J. M.; GRANSER, H.; MILLETT, A. J.; SOMERTON, I. W. Magnetic Interpretation in Three Dimensions Using Euler Deconvolution. **Geophysics**, v. 55, p. 80-91, 1995.

RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M.S.M.; LOURO, V.H.A. Aerogamaespectrometria e Suas Aplicações no Mapeamento Geológico. **Terra e Didática**, v.10. p. 29-51, 2013.

RIBEIRO, V.B.; MANTOVANI, M.S.M. A Multi-Disciplinary Characterisation of Heath Steele Belt Deposits, Bathurst Mining Camp: A Basis for Identifying New Targets for the Exploration. **Near Surface Geophysics**, v.15, n.3, p.322-331, 2013.

ROEST, W.R.; VERHOEF, J.; PLINKINGTOM, M. Magnetic Interpretation Using the 3D Analytic Signal. **Geophysics**, v. 57, p.116-125, 1992.

RUDNICK, R.; GAO, S. Composition of the Continental Crust. *In*: HOLLAND H.D., TUREKIAN N.N. (Org.). **Treatise on geochemistry**. Oxford: Elsevier Pergamon, 2003.

SANTOS, E. J. Ensaio Preliminar Sobre Terrenos e Tectônica Acrescionária na Província Borborema. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. **Anais [...]**. Salvador, p. 47-50, 1996.

SAUNDERS, D.F.; TERRY, S.A.; THOMPSON C.K. Test of National Uranium Resource Evaluation Gamma-Ray Spectral Data in Petroleum Reconnaissance. **Geophysics**, v. 52, p.1547-1556, 1987.

SOUZA NETO J.A.; LEGRAND J.M.; VOLFINGER M.; PASCAL M.L.; SONNET P., 2008. W-Au Skarns in the Neo-Proterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in Northeastern Brazil: An Overview with Emphasis on the Bonfim Deposit. *Mineralium Deposita*. **International Journal for Geology, Mineralogy and Geochemistry of Mineral Deposits**, v. 43, p 185-205, 2008.

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

THOMPSON, D. T. EULDPH: A New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data. **Geophysics**, v.47, p. 31-37, 1982.

ULBRICH H.H.G.J.; ULBRICH M.N.C.; FERREIRA F.J.F.; ALVES L.S.; GUIMARÃES G.B.; FRUCHTING A. Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. **Geologia USP: Série Científica**, v. 9, n.1, p.33-53, 2009.

VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; HACKSPACHER, P.; BABINSKI, M. U/Pb and Sm/Nd Geochronologic Studies of the Eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: Initial Conclusions. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, n.3-4, p. 267-288, 1995.

VAUCHEZ, A.; NEVES, S.P.; TOMMASI, A. Transcurrent Shear Zones and Magma Emplacement in Neoproterozoic Belts of Brazil. *In*: BOUCHEZ, J.L.; STEPHENS, E.; HUTTON, D. **Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics**. Springer Science, 1997.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of Gamma-Ray Spectrometry in Soil/Regolith Mapping and Geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v.17, p. 201-216, 1997.