

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAFAEL UBIRAJARA ROCHA FERREIRA

**CONTRIBUIÇÃO DE DADOS AEROMAGNETICOS PARA O ESTUDO DO
COMPLEXO GRANÍTICO CAÇAPAVA DO SUL**

Caçapava do Sul

2016

RAFAEL UBIRAJARA ROCHA FERREIRA

**CONTRIBUIÇÃO DE DADOS AEROMAGNETICOS PARA O ESTUDO DO
COMPLEXO GRANÍTICO CAÇAPAVA DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof^o Dr. Tiago Rafael Gregory

Caçapava do Sul

2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo (a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

R136c Rocha Ferreira, Rafael Ubirajara

CONTRIBUIÇÃO DE DADOS AEROMAGNETICOS PARA O ESTUDO DO COMPLEXO GRANÍTICO CAÇAPAVA DO SUL/ Rafael Ubirajara Rocha Ferreira.

48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2016. "Orientação: Tiago Rafael Gregory".

1. Geofísica. 2. Aeromagnetometria. 3. Lineamentos Magnéticos. 4. Espectro de potência. 5. Geologia. I. Título.

RAFAEL UBIRAJARA ROCHA FERREIRA

**CONTRIBUIÇÃO DOS DADOS AEROMAGNETICOS PARA O ESTUDO DO
COMPLEXO GRANÍTICO CAÇAPAVA DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 02 de dezembro de 2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Éverton Frigo
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
(UNIPAMPA)

RESUMO

O presente trabalho utiliza dados aeromagnéticos do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul de 2010 da CPRM, para o estudo geofísico do Complexo Granítico Caçapava do Sul. O estudo abrange uma área de aproximadamente 3400km², recobrando em grande parte o município de Caçapava do Sul-RS, tendo como objetivo identificar os lineamentos magnéticos e a profundidade das anomalias magnéticas a partir do *grid* do Campo Magnético Anômalo da área. O processamento do dado aeromagnético recebeu rotinas de filtros de realce: Derivadas Direcionais, Amplitude do Sinal Analítico, Redução ao Polo e Continuação para cima de 50 km. Os resultados obtidos mostram que os lineamentos magnéticos estão associados a lineamentos estruturais com direção NE e NW. Os lineamentos magnéticos NW são relacionáveis aos limites entre as Formações Bacia do Camaquã (BC) e Santa Bárbara (FSB) com o embasamento cristalino, representado pelo Complexo Metamórfico Passo feio (CPMF) e pelo Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS). Estes últimos encontram-se entre as duas bacias sedimentares, que são marcadas por baixos valores de intensidade magnética, representando um alto do embasamento soerguido que serviu de área fonte para as bacias. A profundidade média das anomalias magnéticas encontra-se entorno de 6 km de profundidade, determinada a partir do espectro de potência do Filtro de Continuação para Cima da Redução ao Polo para 50km. Os resultados também ressaltam os limites dos Granitoides Caçapava do Sul e São Sepé com as litologias adjacentes e basaltos da Formação Hilário, os quais ocorrem tanto no CPMF quanto na FSB.

Palavras Chave: Geofísica, Lineamentos magnéticos, Aeromagnetometria, Caçapava do Sul.

ABSTRACT

The present work uses the aeromagnetic data of the Sul-Riograndense Shield Project of 2010 from CPRM, as a geophysical study of the Caçapava do Sul Granite Complex. The study covers an area approximately 3400km², largely covering the municipality of Caçapava do Sul-RS, With the objective of identifying the magnetic lineaments and the depth of the magnetic anomalies from the grid of the Anomalous Magnetic Field of the area. The processing of the aeromagnetic data received enhancement filter routines: Directional Derivatives, Analytical Signal Amplitude, Reduction to the and Upward Continuation to 50 km. The obtained results show that the magnetic lineaments are associated with structural lineaments with direction NE and NW. The NW magnetic lineaments are related to the boundaries between the Camaquã Basin (CB) and Santa Bárbara Formation (SBF) with crystalline basement, represented by the Passo Feio Metamorphic Complex (PFMC) and the Southern Caçapava Granite Complex (SCGC). The latter are located between the two sedimentary basins, which are marked by low values of magnetic intensity, representing a height of the raised basement that served as the source area for the basins. The average depth of the magnetic anomalies is around 6 km deep, determined from the power spectrum of the Continuation Filter to the Top of the Reduction to the Pole for 50km. The results also highlight the boundaries of the Caçapava do Sul and São Sepé Granites with the adjacent lithologies and basalts of the Hilário Formation, which occur in both PFMC and SBF.

Keywords: Geophysics, Magnetic lineaments, Aeromagnetometric, Caçapava do Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização e acesso da área de estudo.	2
Figura 2 - Mapa de localização da área do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (vermelho), Mapa do sinal analítico da anomalia aeromagnética do Escudo Sul-Riograndense e área de estudo (cinza)	3
Figura 3 - Mapa geológico simplificado das unidades do ESRG, área de estudo em cinza.	4
Figura 4 – Mapa Geológico da área de estudo	6
Figura 5 - Modelo digital do terreno com os lineamentos estruturais (linhas amarelas), ocorrência de minerais metálicos (círculos amrelos) e área de estudo (cinza)	9
Figura 6 – Representação dos componentes do campo geomagnético e variação da inclinação do vetor campo magnético terrestre F , com a latitude. Baseada em uma aproximação do campo geomagnético como um único dipolo.	10
Figura 7 – representação vetorial da anomalia de campo total.	12
Figura 8 – Representação da anomalia de campo total. (a) registro vetorial do campo geomagnético e a contribuição anômala de (uma ou mais) fontes locais, (b) Campo anômalo não calculado e (c) Campo anômalo calculado.	13
Figura 9 - Variações da magnetização M com campo magnético aplicado H em materiais paramagnéticos e diamagnéticos.	15
Figura 10 - Representação esquemática da intensidade e orientação de dipolos elementares dentro dos domínios ferrimagnético, ferro magnético e antiferromagnético (KEARY, 2009).	16
Figura 11 - Histograma mostrando os valores médios de suscetibilidade de tipos de rochas mais comuns. (Baseado em Dobrin & Savit, 1988)	16
Figura 12 - Magnetômetro pendurado abaixo de um helicóptero com instalação do tipo bird e, à direita, um magnetômetro com instalação stinger, atrás de um avião de asa fixa.	17
Figura 13 - Fluxograma do processamento dos dados aeromagnéticos	18
Figura 14 – Representação do processo da transformada rápida de Fourier para os dados geofísicos.	20
Figura 15 - Espectro de energia no domínio da frequência, análise espectral e o para separação regional-residual.	21
Figura 16 - Comportamento do filtro, quanto maior for o valor de n , mais fechada é a banda que se deseja cortar.	22
Figura 17 – Campo Magnético Anômalo (a), Derivada horizontal (b) e Derivada vertical (c)	25

Figura 18 – Amplitude do Sinal Análítico (a), Redução ao Polo (b) e Continuação para cima da Redução ao polo (c)	26
Figura 19 - Aplicação do filtro Butterworth A. linha preta é o espectro de potência original e a vermelha é o espectro resultante.	27
Figura 20 – (a) Campo Magnético Anômalo, dividido em DMO e DMC pela AMCS; (b) Derivada horizontal; e (c) Derivada Vertical com lineamentos magnéticos.	29
Figura 21 – (a) Amplitude do Sinal Analítico; e (b) Redução ao Polo, com lineamentos magnéticos.	30
Figura 22 – (a) Derivada horizontal; e (b) Derivada vertical, com polígonos da geologia local (CGCS, CMPF e basaltos da Formação Hilário).	31
Figura 23 - (a) Amplitude do Sinal Analítico; e (b) Redução ao Polo, com polígonos da geologia local (CGCS, CMPF e basaltos da Formação Hilário).	32
Figura 24 - (a) Derivada horizontal; e (b) Derivada Vertical, com polígonos da geologia local (Fomação Santa Bárbara, Arroio dos Nobres e Varzinha).	33
Figura 25 - (a) Derivada horizontal; e (b) Derivada Vertical, com polígonos da geologia local (Fomação Santa Bárbara, Arroio dos Nobres e Varzinha).	34
Figura 26 – Espectro de potência do filtro de continuação para cima da RTP, mostrando o topo das fontes anômalas em profundidade.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ÁREA DE ESTUDO	2
3 MATERIAIS	2
3.1 Dados Cartográficos em formato SIG	2
3.2 Dados Aeromagnéticos.....	3
3.2.1 Parâmetros de aquisição dos dados Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul.....	3
4 GEOLOGIA REGIONAL	4
4.1 Terreno Tijucas.....	5
4.2 Terreno São Gabriel.....	5
4.3 Bacia do Camaquã	5
5 GEOLOGIA LOCAL	6
5.1 Complexo Metamórfico Passo Feio	7
5.2 Grupo Maricá.....	7
5.3 Grupo Bom Jardim	7
5.4 Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS)	8
5.5 Grupo Santa Bárbara	8
5.6 Lineamentos estruturais do CGCS	8
6 MÉTODO MAGNÉTICO	10
6.1 Campo magnético terrestre.....	10
6.2 Campo magnético externo.....	11
6.3 Anomalias Magnéticas	11
6.4 Princípio físico do método magnético	13
6.5 Propriedade magnética das rochas.....	14
6.6 Aeromagnetometria	16
7 PROCESSAMENTO DO DADO MAGNÉTICO	17

7.1 Correção de variação diurna.....	18
7.2 Remoção do IGRF.....	19
7.3 Transformada de Fourier.....	19
7.3.1 Análise espectral.....	20
7.3.2 Separação regional e residual.....	21
7.3.3 Filtro Butterworth.....	21
7.4 Derivadas Direcionais.....	22
7.5 Amplitude do sinal analítico.....	23
7.6 Redução ao Polo.....	23
7.7 Continuação para cima.....	24
8 RESULTADOS E ANÁLISE.....	27
9 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

O Escudo Sul-Riograndense (ESRG) tem grande importância econômica ligada às várias mineralizações de metais base e ouro como as áreas de Camaquã, Caçapava do Sul, Lavras do Sul e São Sepé (SANTOS, 2014). Sendo Caçapava do Sul, uma área sempre destacada nas imagens magnéticas dos estudos geofísicos, como em COSTA (1997), TRAVASSOS (2015) e HARTMANN et al (2016). Parte deste destaque não se deve apenas a ocorrências dos minerais metálicos, mas também das assinaturas geofísicas observadas na área. Uma relevante assinatura geofísica, a Anomalia Magnética Caçapava do Sul (AMCS), Trata - se de um lineamento magnético que é a resposta geofísica de uma estrutura tectônica de escala crustal, denominada de Sutura de Caçapava (CS) e também por Zona Cisalhamento Caçapava do Sul (ZCCS). Esta estrutura demarca o limite entre o terreno São Gabriel (TSG) e a Bacia do Camaquã (BC), conduzindo a um aprofundamento da compreensão das estruturas maiores e do ESRG (HARTMANN et al., 2007).

A análise de lineamentos pode ser considerada como a base para estudos estruturais e geofísicos em uma região, na superfície da Terra estão em formas lineares e podem representar falhas, fraturas e diques. Os lineamentos magnéticos são as zonas lineares criadas devido ao carreamento de material em camadas laterais, fraturas causadas por Falhas e eventos que podem ter favorecido a recristalização de minerais, gerando mudanças consideráveis no campo geomagnético local (ARYAMANESH, 2016).

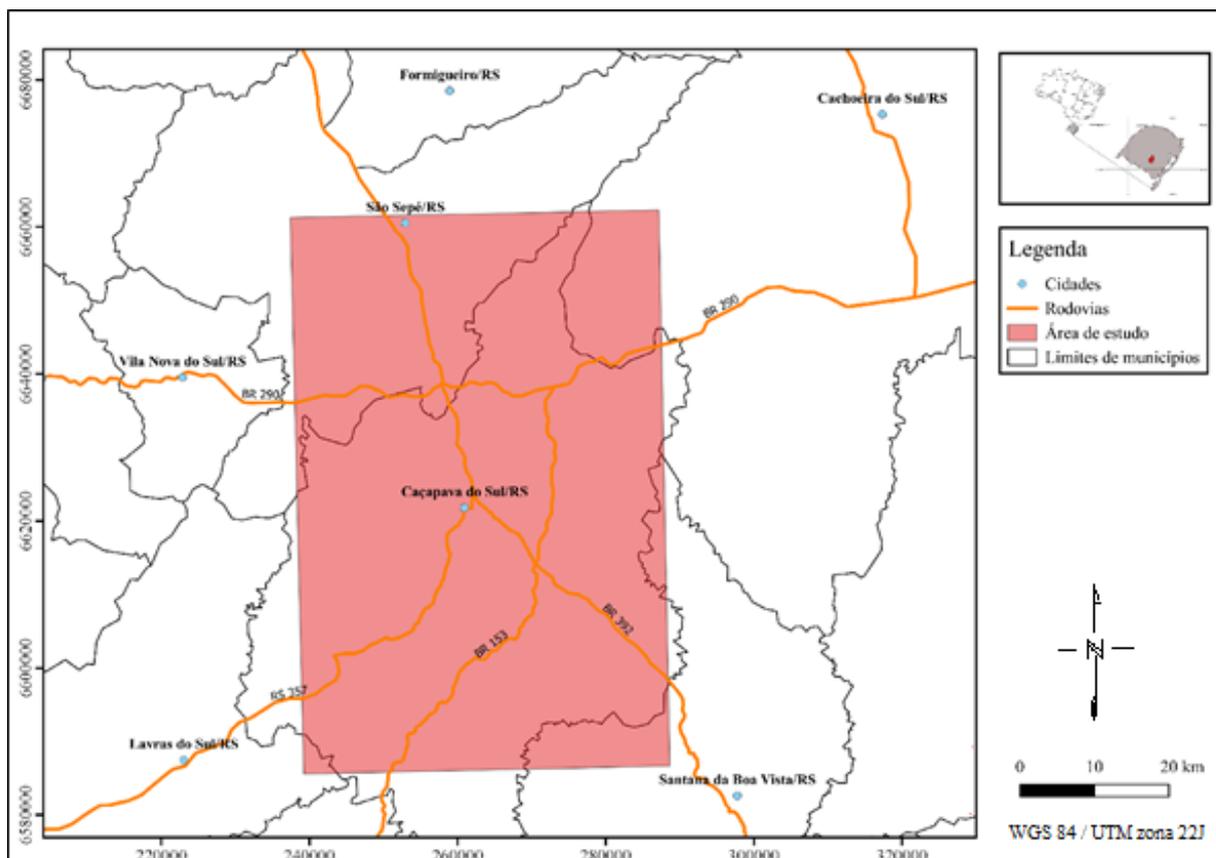
Deste modo o presente trabalho tem como objetivo estudar os lineamentos magnéticos de uma porção do Complexo Granítico Caçapava do Sul e também a profundidade em que se encontram as fontes geradoras das anomalias magnéticas, através de imagens aeromagnéticas realçadas pelos filtros de derivadas direcionais, Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Redução ao Polo (RTP) e Continuação para Cima.

O emprego dos dados geofísicos para interpretações dos lineamentos magnéticos, podem fornecer informações preliminares para a análise dos sistemas tectônicos regionais de uma área de interesse econômico e também de estudos geocientíficos.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) situa-se no município de Caçapava do Sul e possui aproximadamente 3340 km² de área, limitada pelas latitudes 238.281,00 – 287.910,00 m leste e longitudes 6.589.149,00 – 6.658.531,00 m Sul, zona 22J.

Figura 1 - Mapa de localização e acesso da área de estudo.



Fonte: modificado dos arquivos KML Municípios e Rodovias de ROCHA (2012 e 2014).

3 MATERIAIS

3.1 Dados Cartográficos em formato SIG

- Folha Cachoeira do Sul (SH-22-Y-A), contendo o levantamento geológico e a avaliação do potencial mineral, da porção centro-meridional do Estado do Rio Grande do Sul em escala 1: 250.000 (PORCHER & LOPES, 2000).
- Limite dos Estados e municípios do Brasil e Rodovias (ROCHA, 2012 e 2014).

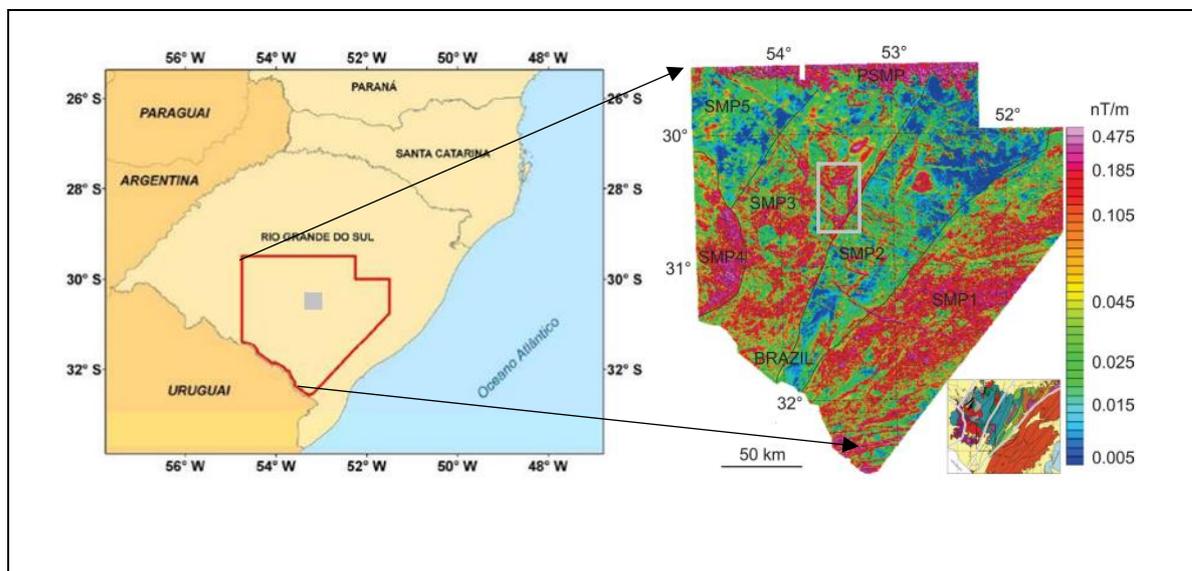
3.2 Dados Aeromagnéticos

Recorte do arquivo em Grid do levantamento aeromagnético, do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010). Os dados aeromagnéticos foram obtidos e pré-processados pela empresa Lasa Prospecções S/A, conta com a remoção da variação diurna, correção do erro de paralaxe e remoção do IGRF (Campo de Referência Geomagnética Internacional).

3.2.1 Parâmetros de aquisição dos dados Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul

A cobertura da área do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul é de 159.789,21 km de extensão e 75.600 km² de área (Figura 2). As linhas de voo N-S possuem espaçamento de 500 m e linhas de controle E-W com espaçamento de 10.000 m. A altura de vôo sobre o terreno é de 100 m. O grid de área é de 125 x 125 m (espaçamento de linhas de voo). O Sistema aeromagnético utilizado foi de um sensor de vapor de césio montado na cauda da aeronave (tipo stinger), com magnetômetro modelo Scintrex CS-2 de resolução de 0,001 nT. As leituras do magnetômetro, ocorreram a cada 0,1 segundo a uma velocidade de 227 km/h da aeronave (PR-SSB), equivalente à aproximadamente 6,3m no terreno. Também foram utilizados dois magnetômetros terrestres para controle diário das variações do campo, modelo GSM-19 de resolução de 0,1nT. Navegação da aeronave por sistemas GPS de 12 canais, com receptores Trimble AgGPS 132 (CPRM, 2010).

Figura 2 - Mapa de localização da área do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (vermelho), Mapa do sinal analítico da anomalia aeromagnética do Escudo Sul-Riograndense e área de estudo (cinza)



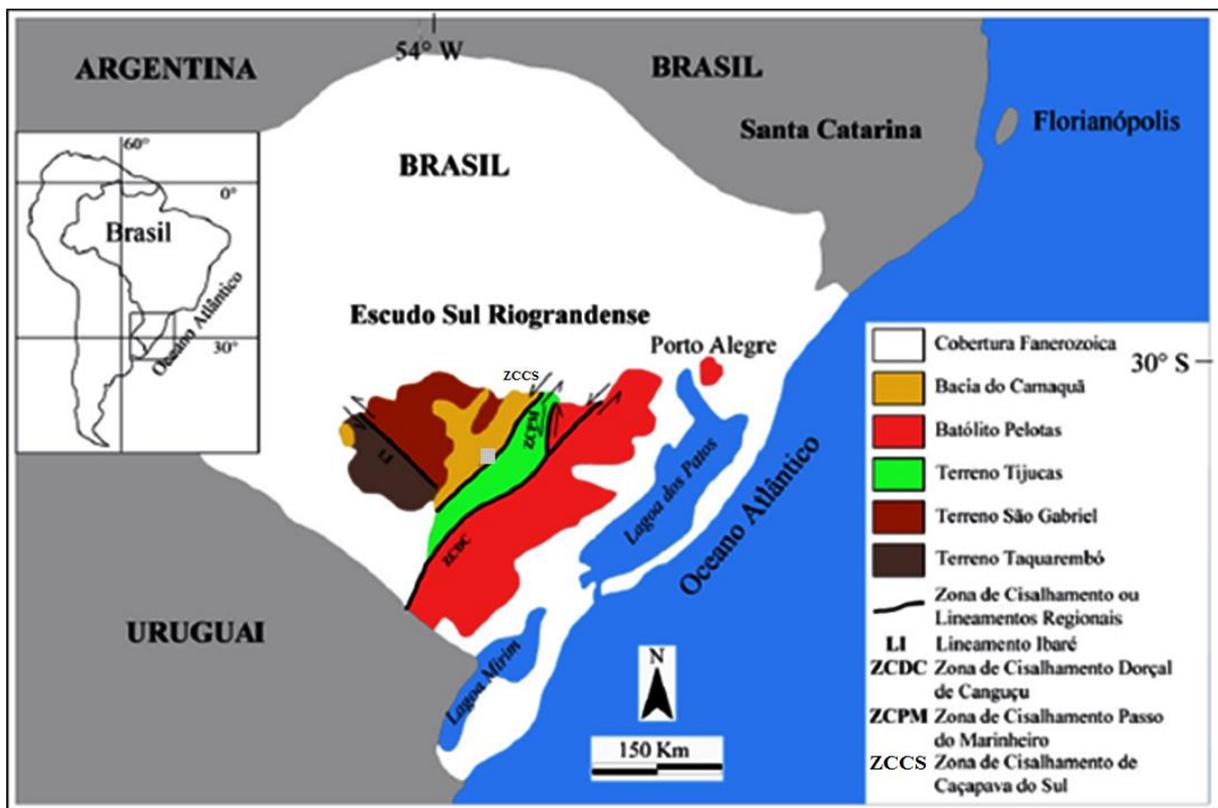
Fonte: modificado de CPRM (2010) e HARTMANN et al (2015).

4 GEOLOGIA REGIONAL

O Escudo Sul-Rio-grandense (ESRG) (Figura - 3) é resultado dos processos de geração e deformação de crosta continental, cuja contribuição maior ocorreu em dois ciclos orogênicos: o Transamazônico (2,26-2,00 Ga) e o Brasiliano (900-535 Ma) (HARTMANN et al., 2007).

O Ciclo Brasiliano envolveu eventos de subducção, acreção e colisão, dando origem ao arcabouço tectônico neoproterozoico do ESrg, que é dividido em cinco unidades geotectônicas (Figura 3): Terreno Taquarembó (TTa), Terreno Tijucas (TT), Terreno São Gabriel (TSG), Batólito Pelotas e Bacias Sedimentares eopaleozoicas ou pós-orogênicas (HARTMANN et al., 2007). A Bacia do Camaquã é a maior representante dessas bacias sedimentares.

Figura 3 - Mapa geológico simplificado das unidades do ESRG, área de estudo em cinza.



Fonte: modificado de Bicca et al. (2013).

O limite entre as unidades do ESRG é marcado por zonas de cisalhamento dúcteis e dúctil-rúpteis que representam estruturas de descontinuidade crustal de escala regional (PHILIPP et al., 2007). Dentre essas unidades, o Terreno São Gabriel (TSG), o Terreno Tijucas (TT) e a Bacia do Camaquã (BC) são as unidades de maior interesse para o presente trabalho, pois estão

diretamente relacionadas espacialmente e tectonicamente com o Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS).

4.1 Terreno Tijucas

O TT ocupa a porção central do ESRG, separado a leste do Batólito Pelotas pela zona de cisalhamento Passo do Marinheiro e Dorsal de Canguçu, e a oeste é separado da Bacia do Camaquã (BC) pela zona de cisalhamento Caçapava do Sul (HARTMANN et al., 2007). Seu embasamento (2,2 Ga) é composto por gnaisses de composição tonalítica-trondhjemítica-granodiorítica (CHEMALE JR., 2000).

4.2 Terreno São Gabriel

O TSG está situado na porção oeste do ESRG e tem como limites ao sul o Lineamento de Ibaré (LI), a leste a zona de cisalhamento Caçapava do Sul e a oeste e norte está coberto pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná (HARTMANN et al., 2007). Este terreno é constituído por associações petro-tectônicas justapostas relacionadas ao desenvolvimento de um ciclo orogênico com idade entre 860 e 680 Ma, reconhecido como Evento São Gabriel (CHEMALE JR., 2000). As relações estruturais sugerem um regime deformacional de transpressão dextral durante o primeiro evento colisional do Ciclo Brasileiro e a evolução de um sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes dúcteis regionais no segundo evento desse mesmo ciclo (HARTMANN et al., 2007). O TSG também possui uma área recoberta, de forma discordante, pelas unidades neoproterozoicas da BC (BORBA et al., 2007).

4.3 Bacia do Camaquã

A BC consiste em uma série de bacias que se sucederam no tempo ocupando um mesmo locus deposicional (BORBA, 2006) e que são alongadas na direção NE-SW. Esta registra em seu preenchimento a evolução dos estágios tardi e pós-colisionais da Orogênese Dom Feliciano (630-510 Ma), bem como uma evolução de ambientes marinhos rasos para continentais, onde dominam os ambientes flúvio-lacustres e desérticos, sendo caracterizada por plutonismo, vulcanismo e sedimentação (LIMA & NARDI, 2007).

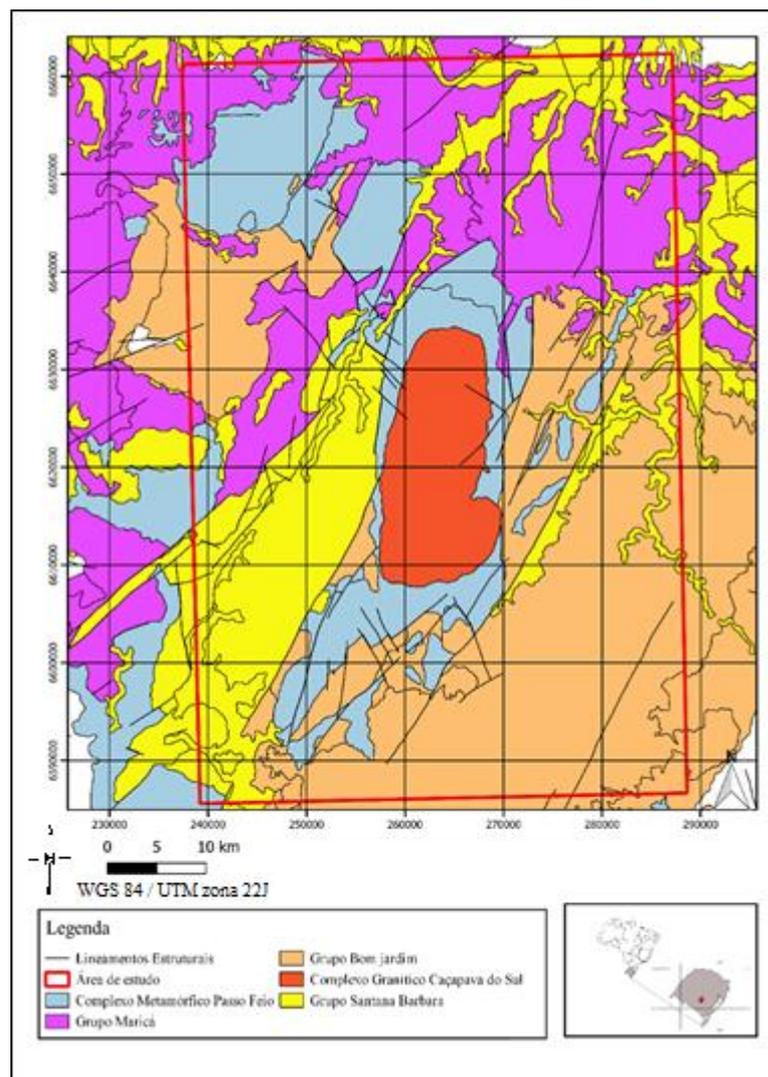
As unidades da BC são constituídas, segundo Paim et al. (2014), por: (i) arenitos, conglomerados, turbiditos e ruditos de depósitos predominantemente costeiros e marinhos da Formação Maricá; (ii) depósitos lacustres caracterizados por processos vulcânicos (Formação Hilário) e sedimentares contemporâneos do Grupo Bom Jardim; (iii) arenitos, conglomerados,

turbiditos intercalados a depósitos efusivos e explosivos da Formação Acampamento Velho, constituindo depósitos continentais fluviais e lacustres rasos do Grupo Santa Bárbara; e (iv) depósitos fluviais, lacustres rasos e eólicos intercalados, na porção basal, com lavas intermediárias a básicas da Formação Rodeio Velho, formando o Grupo Guaritas.

5 GEOLOGIA LOCAL

As principais unidades geológicas representadas na área de estudo são: Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF), Grupo Maricá (GM), Grupo Bom Jardim (GBJ), Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS), Grupo Santa Bárbara (GSB) (Figura 4).

Figura 4 – Mapa Geológico da área de estudo



Fonte: modificado de (PORCHER & LOPES, 2000) e de Borba (2007).

5.1 Complexo Metamórfico Passo Feio

O CMPF é uma sequência vulcano-sedimentar metamorfizada que também é associada ao Complexo Vacacaí (GASTAL & FERREIRA, 2013). Este é composto de metapelitos, anfibolitos, metavulcanoclásticas, metavulcânicas, mármore dolomíticos (e calcíticos subordinados), quartzitos, rochas cálcio-silicáticas, xistos magnesianos e rochas quartzo-feldspáticas que foram submetidas a dois eventos metamórficos regionais principais.

O primeiro evento ocorreu em aproximadamente 700 Ma, metamorfizando as rochas na fácies anfibolito, enquanto o segundo, retrogressivo, provocou o metamorfismo em fácies xisto verde (BITENCOURT, 1983). O metamorfismo de contato, restrito às bordas das apófises de granito, também afetou essas rochas, sendo caracterizado por recristalização (REMUS et al., 2000). Este complexo forma uma antiforme alongada na direção N-S, com mergulho para NW e núcleo ocupado pelo CGCS (BITENCOURT, 1983).

5.2 Grupo Maricá

O GM aflora apenas no Terreno São Gabriel, recobrando rochas ígneas e metamórficas pertencentes aos complexos juvenis Cambaí e Vacacaí (LEINZ et al., 1941). O contato basal da Formação Maricá com essas rochas, que hoje constituem seu embasamento, não possui boas exposições nas regiões Passo do Salsinho, Vila Nova do Sul e Arroio América (BORBA et al., 2007).

Sua idade ainda é indefinida, podendo ter 670 Ma, final da colisão do terreno juvenil com o Cráton La Plata (SAALMANN et al., 2005) e 605 Ma, idade aproximada do magmatismo precoce do CILS (GASTAL et al., 2006.).

O padrão de lineamentos paralelos das camadas basais da Formação Maricá contrasta fortemente com o aspecto maciço do embasamento. Porém, no campo esse contato não é nítido, ocupando áreas planas e cobertas por vegetação. Além disso, intrusões tabulares de andesitos e riolitos, provavelmente representativos das formações Hilário (Grupo Bom Jardim) e Acampamento Velho, com idades entre 600 e 550 Ma, aproveitaram a fraqueza da zona de contato para se posicionarem durante os respectivos eventos magmáticos (BORBA et al., 2007).

5.3 Grupo Bom Jardim

Segundo JANIKIAN et al (2003) o GBJ, apresenta uma área de aproximadamente 220 km² e cerca de 4 km de espessura, com contatos por falha a leste com unidades do Grupo Santa

Bárbara e a oeste com rochas do embasamento metamórfico do CMPF, também é subdividido nas formações Cerro da Angélica (basal), Hilário e Picada das Graças (topo).

A Formação Cerro da Angélica apresenta turbiditos gerados em sistemas de leques sublacustres, além de depósitos de fundo de bacia e depósitos deltaicos progracionais. A Formação Hilário, com espessas sucessões de rochas vulcânicas e piroclásticas colocadas em ambiente subaquático, representa possivelmente o período de maior atividade das falhas relacionadas à geração da bacia. A Formação Picada das Graças, posterior ao período de maior atividade vulcânica, apresenta depósitos deltaicos gerados em período de quiescência tectônica (JANIKIAN et al., 2003).

5.4 Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS)

O CGCS intruiu as rochas supracrustais do CMPF há 562 ± 8 Ma e forma um corpo alongado na direção N-S, constituído predominantemente por leucogranitos, monzogranitos e granodioritos com magma formador derivado da fusão de rochas crustais do embasamento, que ocorreu durante o período de soergimento regional em regime transtensivo (REMUS et al., 2000).

A intrusão do granito é sintectônica a uma zona de cisalhamento transcorrente, gerando estruturas de deformação planares e lineares nas unidades CMPF e Alogrupo Bom Jardim (REMUS et al., 1999).

5.5 Grupo Santa Bárbara

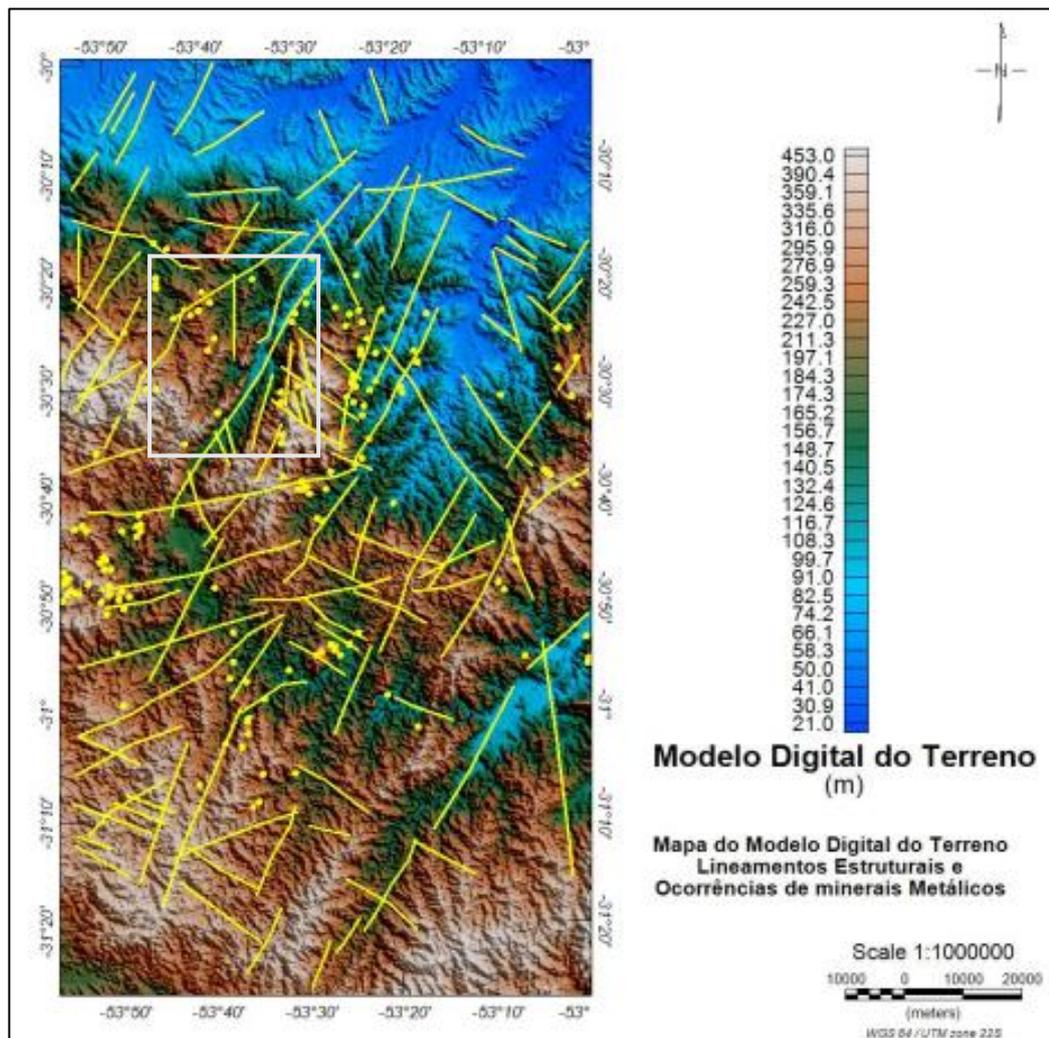
A GSB, segundo Robertson (1966), é uma sucessão com aproximadamente 2,5 km de espessura de conglomerados, arenitos e siltitos de coloração castanha avermelhada. Apresenta a evolução de uma bacia sedimentar gerada por esforços associados de extensão e transcorrência nos estágios pós-colisionais do Ciclo Brasileiro/Pan-Africano na região do ESrg (BORBA et al., 2002). Na sua base, a Formação Acampamento Velho é composta por rochas vulcânicas e piroclásticas de composição ácida com idade de $545,1 \pm 12,7$ Ma (ALMEIDA et al., 2001). Este grupo aflora de forma contínua ao longo de 400 km² a oeste e sudoeste da cidade de Caçapava do Sul, na região central do estado do Rio Grande do Sul (ROBERTSON, 1966).

5.6 Lineamentos estruturais do CGCS

Segundo Gastal & Ferreira (2013), os principais lineamentos tectônicos que ocorrem no CGCS (Figura 5) possuem direção preferencial NE-SW e afetam o CMPF, CGCS e GBJ. Os

lineamentos N25-30°E a leste do CGCS são longos, densos e retilíneos, e estão compreendidos nas zonas de falhas Angélica, Cerro do Caboclo e Mato Grande. Estas são interceptadas e deslocadas por lineamentos NW-SE sinistrais e controlam o contato entre a Formação Hilário, o CMPF e o Grupo Guaritas. A oeste do CGCS, os lineamentos são longos, curvos e seguem direções preferenciais que variam de N15-20°E a N30°E (Zonas de Falhas Segredo e Santa Bárbara), que interceptam a Zona de Falhas Cerro dos Cabritos, de direção N30-45°E, além desses, há lineamentos N40-45°W a N55-60°W no alto de Caçapava do Sul e a oeste, onde estão concentrados em duas faixas com lineamentos contínuos e curvos (GASTAL & FERREIRA, 2013). Essas falhas são pertencentes ao Sistema de Falhas Irapuá, formadas durante orogenia colisional do Cinturão Dom Feliciano e controlam as mineralizações ocorrentes nessas unidades geológicas (RIBEIRO et al., 1966).

Figura 5 - Modelo digital do terreno com os lineamentos estruturais (linhas amarelas), ocorrência de minerais metálicos (círculos amarelos) e área de estudo (cinza)



Fonte: modificado de SANTOS (2014).

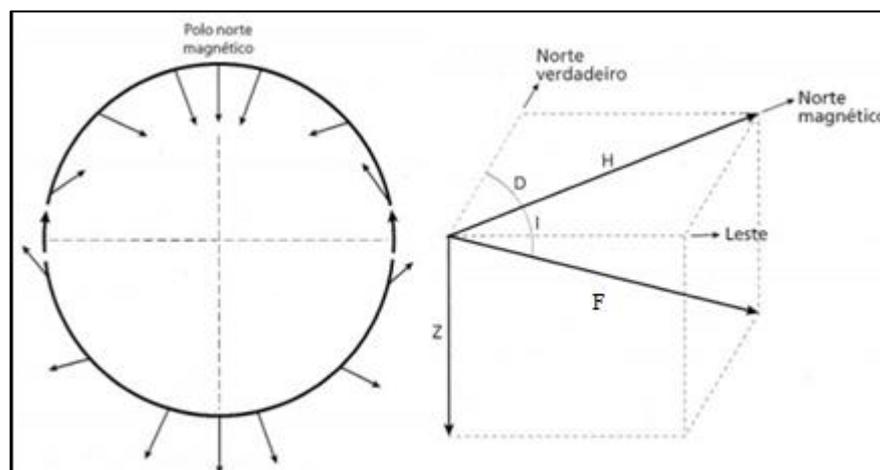
6 MÉTODO MAGNÉTICO

É um método potencial que investiga a geologia com base nas anomalias do campo geomagnético, resultante da variação da propriedade magnética das rochas em subsuperfície (DOBRIN & SAVIT, 1988). A anomalia magnética é a diferença entre a intensidade do campo magnético em um ponto e a intensidade média do campo regional, podendo ser positivas ou negativas (Telford et al., 1990). O estudo do campo geomagnético é constituído pelo conjunto de medições do campo magnético terrestre, os campos magnéticos externos e pelo campo magnético anômalo (KEARY, 2009).

6.1 Campo magnético terrestre

O campo magnético terrestre tem origem no interior da Terra e varia de direção e magnitude com o tempo. Considerando a Terra como uma esfera uniformemente magnetizada, equivalente a um dipolo magnético. Sua intensidade (Figura 6) é dada por F , resultante das componentes ortogonais (1): F_x , que aponta positivamente para o Norte; F_y , aponta positivamente para o Leste e F_z , aponta positivamente para o centro da Terra. Os outros elementos que compõe o campo magnético terrestre são: a componente horizontal H , de Intensidade Horizontal (2), resultante das componentes F_x e F_y , cujo ângulo entre eles é denominado de Declinação magnética D (3) e a Inclinação magnética I (4), que é o ângulo entre a componente H e o vetor F_z (TELFORD et al., 1990).

Figura 6 – Representação dos componentes do campo geomagnético e variação da inclinação do vetor campo magnético terrestre F , com a latitude. Baseada em uma aproximação do campo geomagnético como um único dipolo.



Fonte: modificado de (KEARY, 2009).

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

$$H = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (2)$$

$$D = \text{tg}^{-1} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) \quad (3)$$

$$I = \text{tg}^{-1} \left(\frac{F_z}{H} \right) \quad (4)$$

Onde: D e I são medidos em graus e os outros elementos são medidos em nanotesla (nT; 1nT= 10⁻⁹Tesla) (WHITHAM, 1960).

6.2 Campo magnético externo

É um campo menor, originado no exterior da Terra e varia rapidamente com o tempo e ocorre devido as correntes elétricas em camadas ionizadas na atmosfera (TELFORD et al., 1990). Estas variações são classificadas como:

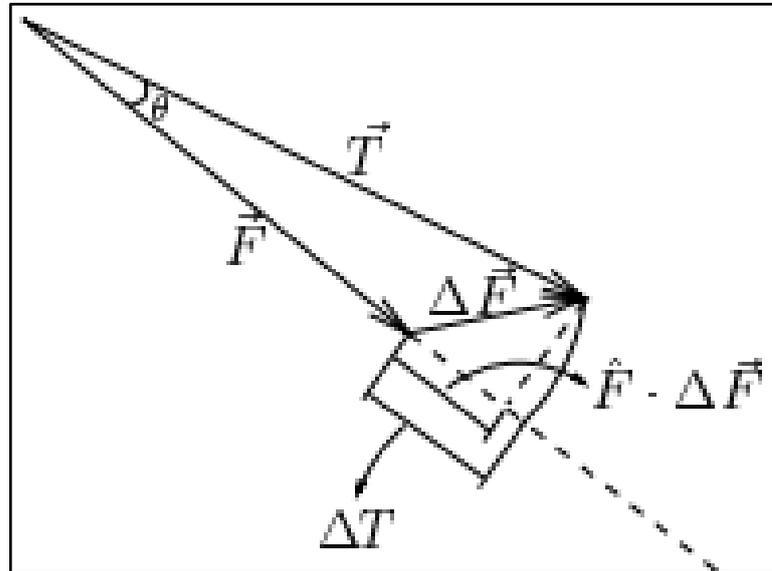
- Variações diurnas ou solares, que ocorrem em um período de 24 horas e sua intensidade varia com a latitude e estações do ano. São controladas por ventos solares e correntes ionosféricas;
- Variações lunares, que ocorrem em um período de 25 horas, variando ciclicamente durante o mês, associada à interação gravitacional ionosfera-Lua;
- Tempestades magnéticas, são fenômenos aleatórios que podem ocorrer em um intervalo de 27 dias, devido a atividades solar. Estas tempestades geram distúrbios transientes com amplitude acima de 1000 nT em baixas latitudes e ainda maiores em regiões polares, onde está associada à aurora boreal.

6.3 Anomalias Magnéticas

As anomalias magnéticas, são as mudanças locais do campo magnético terrestre, resultantes da contribuição dos minerais magnéticos que formam as rochas próximas da superfície terrestre. As fontes de anomalias magnéticas locais não podem ser muito profundas porque as temperaturas abaixo de 40 km de profundidade ultrapassam o ponto de Curie (<<550°C), ponto onde as rochas perdem suas propriedades magnéticas, portanto, as anomalias locais encontram-se na crosta terrestre (TELFORD et al., 1990).

A anomalia de campo total ΔT é a anomalia magnética (Figura 7 e 8), calculada a partir de medidas de campo total subtraído da magnitude de um campo regional \vec{F} , geralmente utiliza-se o modelo IGRF (Campo de Referência Geomagnética Internacional) (BLAKELY, 1996).

Figura 7 – representação vetorial da anomalia de campo total.



Fonte: modificado de Gomes (1999) e BLAKELY (1996).

O vetor \vec{T} representa o campo total em qualquer ponto e \vec{F} é o campo regional no mesmo ponto, então a anomalia de campo total pode ser obtida por:

$$\Delta T = |\vec{T}| - |\vec{F}| \quad (5)$$

Podendo ser aproximado para:

$$\Delta T = \hat{F} \cdot \Delta\vec{F} \text{ se } |\vec{F}| \gg \Delta\vec{F} \quad (6)$$

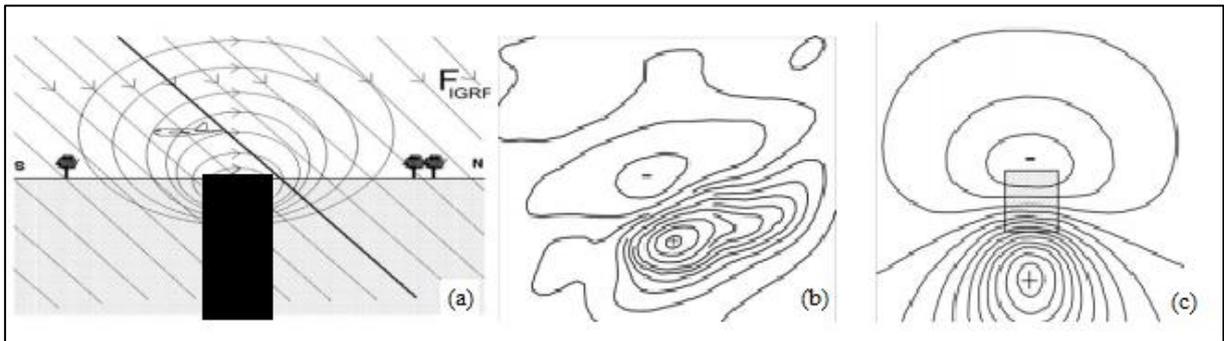
Onde:

\vec{T} é o campo total, sendo a soma vetorial do campo regional \vec{F} e do campo anômalo $\Delta\vec{F}$;

ΔT é o comprimento que representa a anomalia de campo total;

\hat{F} é o versor na direção do campo \vec{F} e ΔT .

Figura 8 – Representação da anomalia de campo total. (a) registro vetorial do campo geomagnético e a contribuição anômala de (uma ou mais) fontes locais, (b) Campo anômalo não calculado e (c) Campo anômalo calculado.



Fonte: modificado de Reeves (2005).

O IGRF (Campo de Referência Geomagnética Internacional) define o campo magnético teórico não perturbado em qualquer ponto da superfície da Terra. (KEARY, 2009). O modelo é atualizado a cada cinco anos e os cálculos são realizados pela IAGA (Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia) (RIDLEY, 2003).

6.4 Princípio físico do método magnético

O princípio físico do método magnético se concentra no estudo do campo magnético dos materiais. Quando um material magnético é colocado em meio a um campo já existente, a magnetização resultante produzirá um campo magnético (ou fluxo magnético) B adicional na região ocupada pelo material e uma intensidade magnética H (KEARY, 2009).

$$H = \mu_0 J_i \quad (7)$$

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J_i \quad (8)$$

Sendo:

J_i , magnetização induzida ou imantação;

μ_0 , a permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$).

A unidade de B é em nT (nano Tesla) devido ao baixo valor das anomalias magnéticas terrestres e a unidade da H é em A/m (Ampère por metro).

O campo magnético de um material magnético também pode ser resolvido da seguinte forma:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J_i \quad (9)$$

$$= \mu_0 H + \mu_0 (kH) \quad (10)$$

$$= (1 + k)\mu_0 H \quad (11)$$

$$B = \mu_r + \mu_0 H \quad (12)$$

Onde: k , é susceptibilidade magnética do material e é adimensional ; μ_r , é a permeabilidade magnética relativa do material.

6.5 Propriedade magnética das rochas

A propriedade magnética das rochas é dada pela soma das propriedades magnéticas dos minerais magnéticos que a rocha contém. As propriedades magnéticas das rochas são muito variáveis dentro de um tipo de rocha, dependem da composição química, e da forma de cristalização, deformações e de sua estrutura. Apresentando dois tipos principais de magnetização: induzida J_i e remanescente ou remanente J_r (TELFORD et al, 1990).

A magnetização induzida J_i é a resposta magnética da rocha decorrente da aplicação de um campo externo H .

A magnetização remanente J_r , é adquirida durante a cristalização dos minerais magnéticos das rochas, os quais se orientam segundo a direção do campo magnético atuante na Terra na época de sua cristalização. Sendo subdivida em:

- Natural, adquirida sob condições naturais;
- Termal, adquirida durante o resfriamento (lavas);
- Isotermal, adquirida num curto intervalo de tempo (ordem de segs);
- Química, adquirida por cristais (pequenos) de magnetita imediatamente abaixo da temperatura de Curie;
- Termo-química, adquirida durante alteração química e esfriamento
- Detrítica, adquirida durante a deposição sedimentar;
- Pós-deposicional, adquirida após a deposição sedimentar;
- Viscosa, adquirida depois de uma longa exposição ao campo.

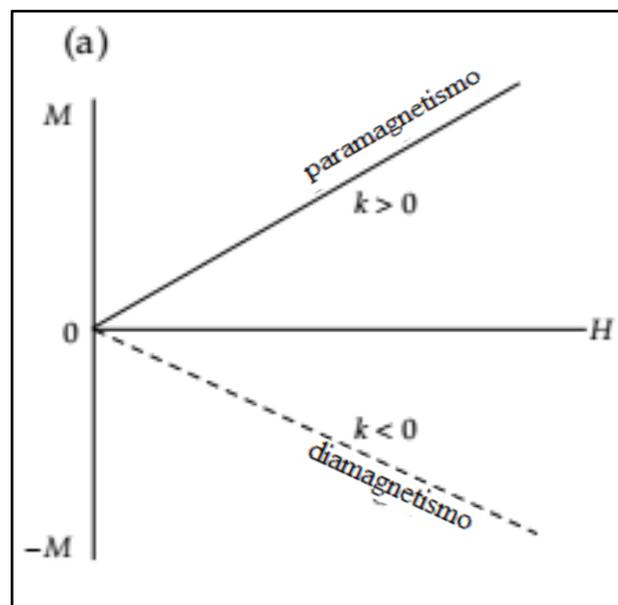
A magnetização total J é um vetor resultado da soma da magnetização remanescente e da induzida. Esta é aproximadamente proporcional ao campo aplicado, sendo a constante de proporcionalidade conhecida como susceptibilidade magnética (k) (TELFORD et al, 1990). Assim, quando um campo magnético F é aplicado, a magnetização induzida e total é dada por:

$$J_I = kF \quad (13)$$

$$J = kF + J_R \quad (14)$$

A Susceptibilidade magnética é uma propriedade física inerente as rochas. Trata-se de uma grandeza adimensional diretamente proporcional ao conteúdo de minerais ferromagnéticos, e dependente da J e H, e influenciando no comportamento de magnetização M dos materiais (Figura 9 e 11) distinguindo-os em: diamagnético, paramagnético e ferromagnético (KEARY, 2009).

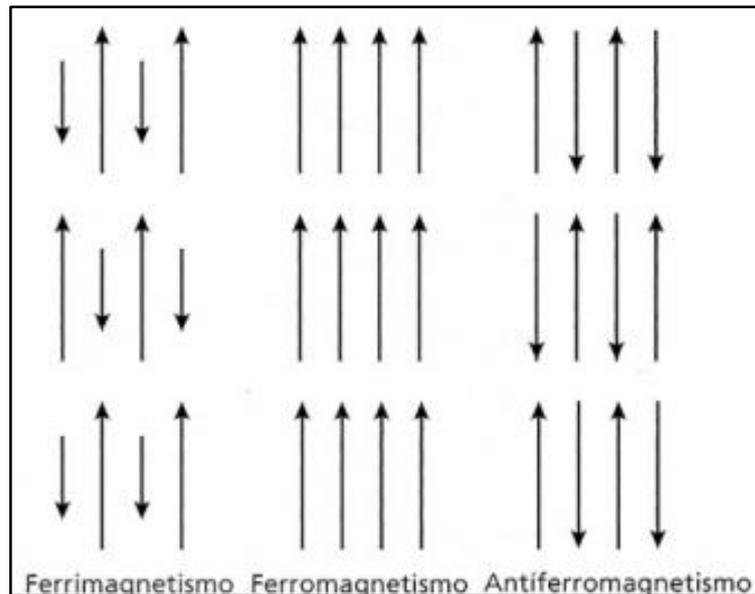
Figura 9 - Variações da magnetização M com campo magnético aplicado H em materiais paramagnéticos e diamagnéticos.



Fonte: modificado de LOWRIE (2007).

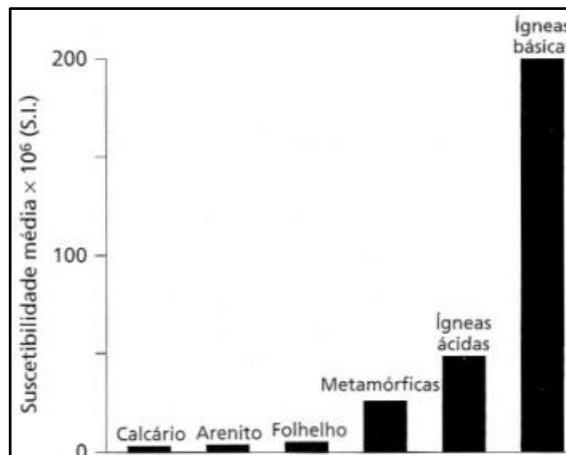
- Comportamento diamagnéticos, a susceptibilidade é baixa e de sinal negativo, isto é, uma magnetização M desenvolve no sentido oposto ao campo aplicado;
- Comportamento paramagnéticos têm susceptibilidades baixas e sinal positivo;
- Comportamento ferromagnéticos podem ser subdivididos em três categorias (figura 11): antiferromagnetismo, ferromagnetismo e ferrimagnetismo. O comportamento ferromagnético é caracterizado por altas susceptibilidades, sinais positivos e forte propriedade magnética.

Figura 10 - Representação esquemática da intensidade e orientação de dipolos elementares dentro dos domínios ferrimagnético, ferro magnético e antiferromagnético.



Fonte: KEARY (2009).

Figura 11 - Histograma mostrando os valores médios de suscetibilidade de tipos de rochas mais comuns. (Baseado em Dobrin & Savit, 1988)

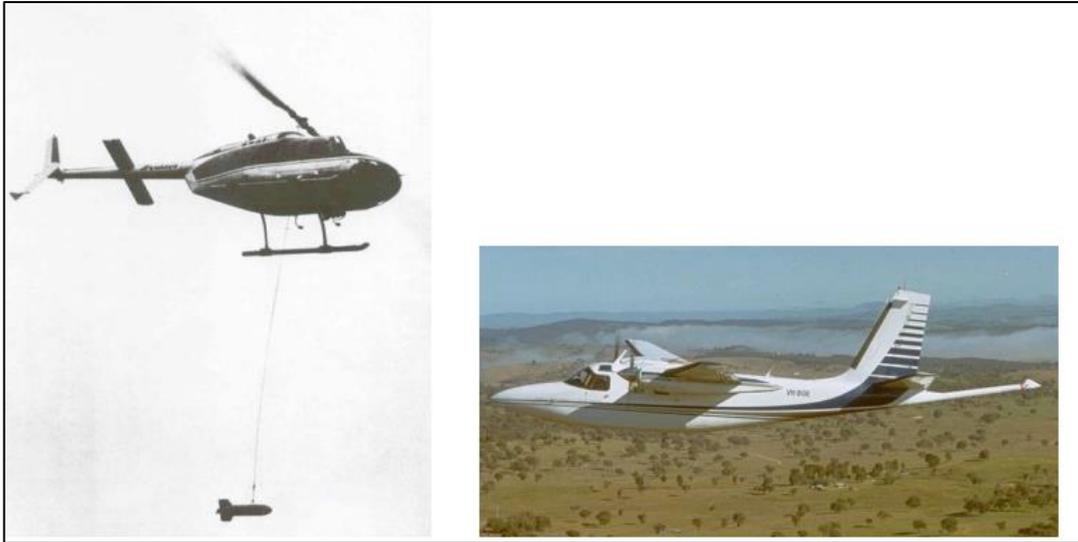


Fonte: KEARY (2009).

6.6 Aeromagnetometria

A aeromagnetometria é uma das técnicas de geofísica aerotransportada, podendo ser efetuada por aviões e helicópteros, utilizada para estudos de grandes dimensões e regiões de difícil acesso com custo relativamente baixo. A altura de voo e a direção das linhas de voo devem ser escolhida conforme as dimensões do alvo do levantamento e a direção do strike da geologia regional (Luiz & Silva, 1995). Os sensores utilizados na aeromagnetometria podem ser: sensor de bico (stinger) ou cabos (bird) (Figura - 12).

Figura 12 - Magnetômetro pendurado abaixo de um helicóptero com instalação do tipo bird e, à direita, um magnetômetro com instalação stinger, atrás de um avião de asa fixa.



Fonte: REEVES (2005).

Algumas correções devem ser efetuadas antes da aquisição como: voos de teste e calibração para a Compensação Magnética Dinâmica, que consiste em eliminar os ruídos no campo magnético induzidos pelo movimento da aeronave (SORDI, 2007). Os efeitos magnéticos dependem da altura de voo:

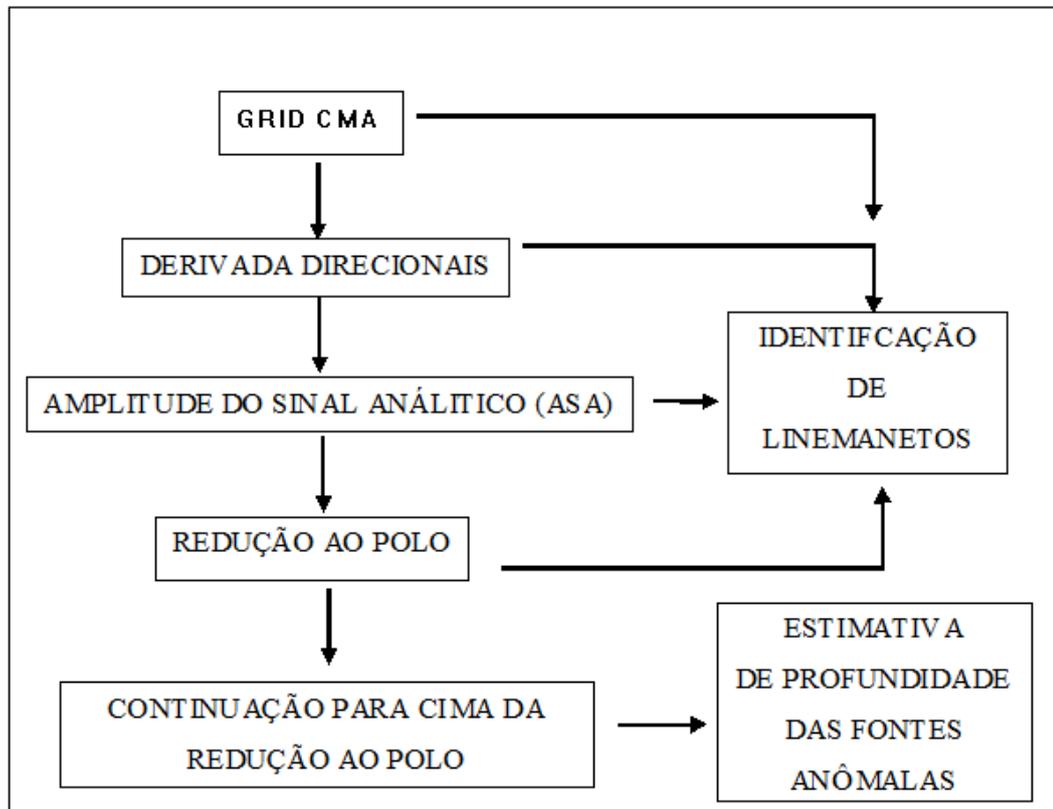
- Se maiores, os efeitos de fontes magnéticas rasas não serão incorporados às medidas e o nível de detalhe será menor;
- Se a altura de voo for menor, ou seja, mais próximo da fonte, maior será o nível de detalhe e irá incorporar aos dados as fontes magnéticas mais rasas, porém este procedimento pode resultar em ruídos por efeito de pequenas fontes anômalas (Luiz & Silva, 1995).

7 PROCESSAMENTO DO DADO MAGNÉTICO

Como mencionado no item 3.1, os dados já possuem o pré-processamento, resultando no grid do Campo Magnético Anômalo (CMA), exibindo a heterogeneidade magnética da área de estudo em formas de anomalias dipolares, as quais podem representar as diferentes profundidades e concentração de material magnético (RAMOS, 2011). O grid dos dados apresenta leve rotação devido à mudança de zona UTM. O dado bruto encontrava-se na zona

21J, sendo modificado, no corte do grid, para a zona 22J. As rotinas computacionais (Figura 13) utilizam filtros no domínio de Fourier, produzindo imagens realçadas para uma melhor interpretação qualitativa ou quantitativa. O processamento utilizou as ferramentas do software Oásis monta v.6.0 (Geosoft, 1999).

Figura 13 - Fluxograma do processamento dos dados aeromagnéticos



Fonte: autor.

7.1 Correção de variação diurna

São distúrbios magnéticos, também conhecidos como pulsações geomagnéticas ou micropulsações, que ocorrem randomicamente e possuem períodos de 1 segundo até pouco mais que 2 minutos, com amplitudes de 0.1 à 200 nT (NABIGHIAN et al, 2005).

A remoção da variação tem como finalidade monitorar as pequenas taxas de mudança do campo geomagnético e sincronizar com os dados da estação do magnetômetro móvel. Desta forma, o resultado é um valor residual que é apenas função de posição (LUYENDYK, 1997).

7.2 Remoção do IGRF

As anomalias magnéticas são perturbações ou desvios do campo geomagnético terrestre. Para definir uma anomalia é necessário subtrair o valor do campo normal de cada medida tomada no levantamento (LUIZ & SILVA, 1995). Isto equivale à remoção da influência do campo geomagnético de referência (IGRF) dos dados do levantamento (KEAREY et al., 2002).

7.3 Transformada de Fourier

Os processos de filtragem ocorrem-no domínio da frequência espacial ou Fourier. Qualquer função no domínio espacial pode ser representada completamente como espectros de número de onda e fase. Estes espectros mostram o poder ou o conteúdo energético dos dados plotados contra os diferentes comprimentos de onda presentes no campo de anomalias. A transformação direta do domínio espacial para o domínio do número de onda e vice-versa, sem perda de informações (REEVES, 2005). Podendo ser expressa por:

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ikx} dx \quad (15)$$

As funções $F(k)$ e $f(x)$ formam um par de transformadas, a primeira pertencente ao domínio do número de onda e a segunda no domínio do espaço; e^{-ikx} , é a combinação de exponenciais complexas (BRIGHAM, 1974). A transformada de inversa de Fourier é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} F(k)e^{-ikx} dk \quad (16)$$

A transformada de Fourier para uma função de duas variáveis é expressa da seguinte forma:

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y)e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (17)$$

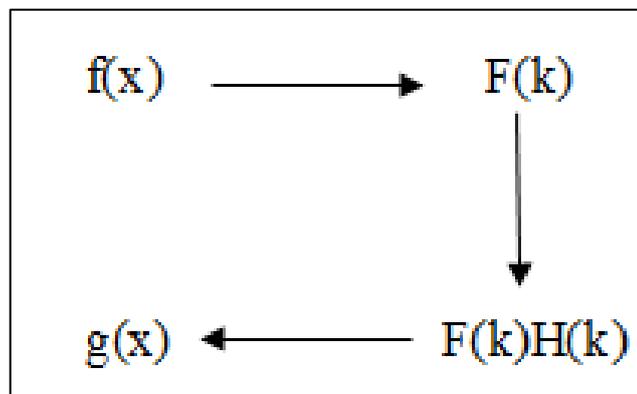
Sua transformada inversa, dada por:

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (18)$$

Onde: k_x e k_y , são inversamente relacionados ao comprimento de onda nas direções x e y , respectivamente: $k_x = 2\pi/\lambda_x$ e $k_y = 2\pi/\lambda_y$.

Os algoritmos computacionais para o processamento 2D dos dados geofísicos, baseiam-se na Transformada discreta de Fourier, de modo que a transformada seja finita, sendo possível o uso de com valores vazios (zero). O resultado desta transformada (Figura 14) é então multiplicado por um operador simples, facilitando todo o processamento computacional dos dados no domínio do número de onda.

Figura 14 – Representação do processo da transformada rápida de Fourier para os dados geofísicos.

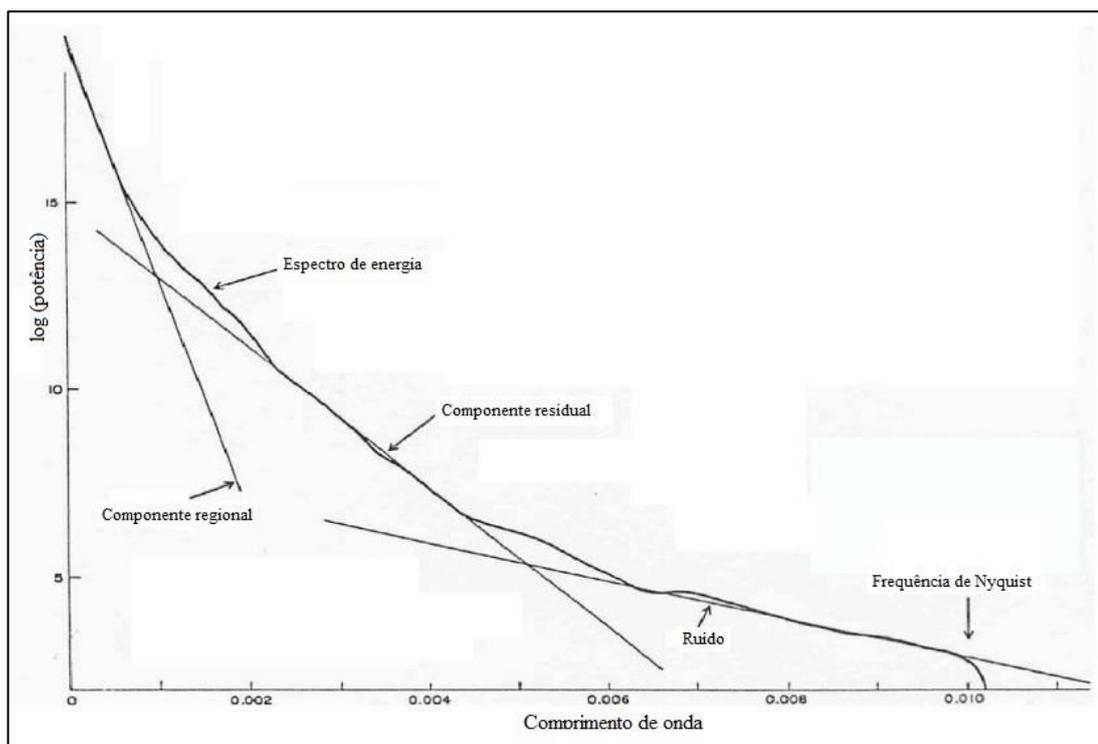


Fonte: autor.

7.3.1 Análise espectral

A análise espectral serve para analisar um determinado conjunto de dados, permitindo que decisões sejam tomadas com base no exame do espectro de energia (Figura 15), um gráfico de média radial pelo número de onda, em geral, verifica-se que os campos potenciais das anomalias de campo, apresentam de forma aproxima à um espectro, de tal forma que a energia proveniente de fontes grandes e profundas possuem baixos valores de número de onda e fontes relativamente pequenas, possuem número de onda elevado O número de onda de Nyquist, é onde geralmente ocorre o predomínio de ruído (REEVES, 2005).

Figura 15 - Espectro de energia no domínio da frequência, análise espectral e o para separação regional-residual.



Fonte modificado de REEVES (2005).

7.3.2 Separação regional e residual

Quando uma população estatística existe em torno de uma profundidade de fonte específica, então a expressão da fonte em um gráfico do logaritmo no espectro de energia em relação ao número de onda é uma linha reta. Quando um espectro mostra várias linhas retas, tem-se então, populações estatísticas de fontes existem em várias profundidades. Três linhas podem ser reconhecidas, dividindo em partes o espectro, rotulado como: Componente regional, componente residual e ruído.

Em geral, quanto melhor for a separação entre as linhas do espectro de energia, melhor será a separação das fontes anômalas. No entanto, esta separação nunca é perfeita, porque fontes a qualquer profundidade tendem a contribuir para todos os números de ondas (REEVES, 2005).

7.3.3 Filtro Butterworth

O filtro é a resposta em frequência, caracterizada por uma faixa de passagem e por uma faixa de rejeição, as quais estão separadas por uma faixa de transição ou faixa de guarda. As frequências dentro da faixa de passagem podem ser recuperadas com pouca ou nenhuma distorção, ao passo que aqueles sinais que têm frequências dentro da faixa de rejeição são

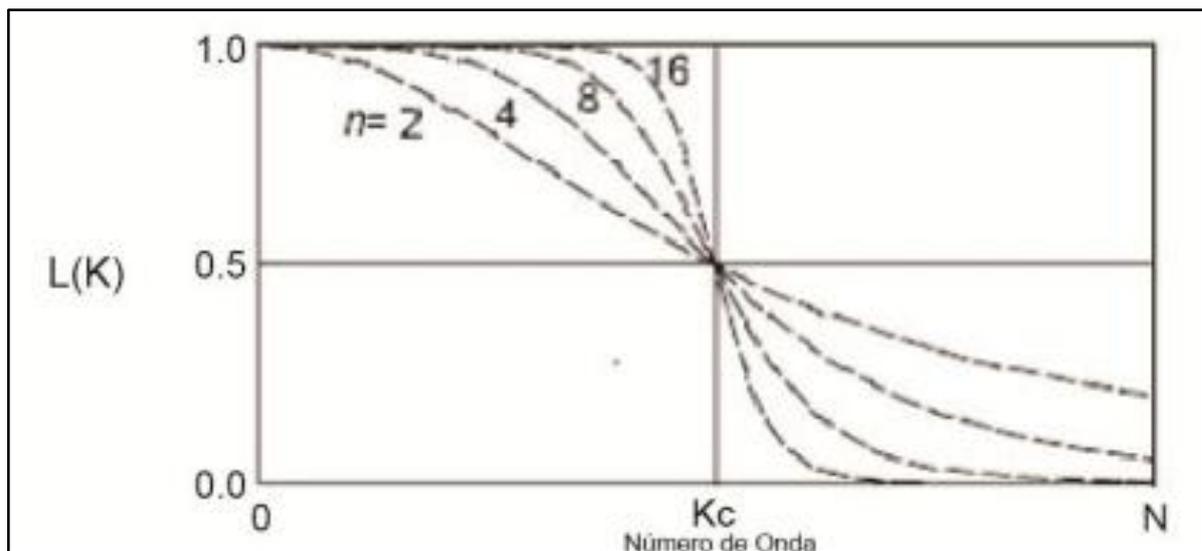
efetivamente atenuados. Desta forma, os filtros podem ser do tipo passa baixa, passa alta, passa faixa ou rejeita faixa (GCAR, 2016).

O filtro Butterworth é um filtro utilizado no domínio da frequência, que atenua a decorrução ou micronivelamento, podendo ser utilizado como como passa baixa, alta ou faixa (GEOSOFTE, 2009). O controle de filtragem é feito através da variação do grau de corte n e número de onda k , a equação (19) e a Figura 16, demonstram o funcionamento do filtro.

$$L(k) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{k}{k_0}\right)^n\right]} \quad (19)$$

Onde: K_0 é o número de onda central do filtro; n é o grau da função do filtro de Butterworth; L , expressa a primeira derivada direcional ao longo da componente de medida, definida como cosseno diretor (GEOSOFTE, 2009).

Figura 16 - Comportamento do filtro, quanto maior for o valor de n , mais fechada é a banda que se deseja cortar.



Fonte: GEOSOFTE (2009).

7.4 Derivadas Direcionais

As derivadas dos campos potenciais são utilizadas para ampliar os sinais de alta frequência, proveniente de fontes rasas e eliminar os efeitos regionais de grandes comprimentos de onda (MILLIGAN & GUNN, 1997). A derivada horizontal (20) enfatiza a bordas geológicas nos perfis dos dados geofísicos. A derivada vertical (21), realça as fontes geológicas mais rasas nos dados.

$$L(\omega) = (\omega i)^n \quad (20)$$

$$L(\omega) = \omega^n \quad (21)$$

Onde: n , é a ordem de diferenciação e i é o número imaginário.

A imagem proveniente das Derivadas Direcionais (Figura 17b e c) são mais sensíveis a influência dos efeitos locais, portanto, tendem a ter uma imagem mais nítida das anomalias magnéticas menores, sendo facilmente perceptível em áreas de fortes perturbações regionais, delineando características de alta frequência mais claramente onde estão sombreada por uma grande amplitude, anomalias de baixa frequência, podendo fornecer informações das unidades magnéticas como contatos, descontinuidades e lineamentos (NABIGHIAN, 2005).

7.5 Amplitude do sinal analítico

A amplitude do Sinal Analítico corresponde a uma variedade de métodos automáticos ou semiautomáticos, baseados nas derivadas horizontais e vertical das anomalias de campos potenciais (22), sendo uma função simétrica em formato de sino (bell shaped), com seu máximo exatamente sobre o topo de cada contato, e sua largura relacionada diretamente com a profundidade do corpo (ROEST). Este método foi desenvolvido por Nabighian em 1972 e permite que os picos das fontes magnéticas estejam centrados nas bordas do corpo anômalo ou da feição geológica correspondente, independentemente da direção da magnetização e fonte do Campo Magnético Terrestre (Millingan & Gunn, 1997).

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial z}\right)^2} \quad (22)$$

Onde: m é a anomalia do campo potencial; $\partial M/\partial x$ e $\partial M/\partial y$ são as primeiras derivadas horizontais e $\partial M/\partial z$ é a primeira derivada vertical.

O filtro de Amplitude do Sinal Analítico é um filtro de mapeamento de bordas de corpos (Figura 18a). Particularmente em locais onde a fonte é rasa, onde a latitude magnética é baixa e onde a magnetização remanescente é significativa, os resultados são satisfatórios (Li, 2006).

7.6 Redução ao Polo

A forma de uma anomalia magnética, depende da geometria do corpo causador, inclinação e declinação da magnetização do corpo e do campo geomagnético. Para simplificar

a forma da anomalia, Baranov (1957) e Baranov e Naudy (1964) propuseram uma abordagem matemática conhecida como redução ao pólo (NABIGHAN, 2005)

A redução ao Polo (RTP) é utilizada em áreas de altas e médias latitudes, recalculando a intensidade dos dados como se estivessem localizados no polo, onde a magnetização induzida é vertical, com o objetivo de tornar as anomalias magnéticas independentes da direção da indução do campo geomagnético, auxiliando na interpretação, pois transforma uma anomalia de caráter dipolar em uma anomalia monopolar, deslocando o máximo da anomalia para a cima do corpo causador (Telford et al., 1976) (Figura 18b). A equação (23) apresentada é a utilizada pelo software Oasis montaj.

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I_a) - i \cos(I) \cdot \cos(D + \theta)]} \quad (23)$$

Onde: I é a inclinação geomagnética; I_a é a inclinação para a correção de amplitude e se ($I < I_a$), ($I = I_a$), D é a declinação do campo geomagnético da região na época do levantamento e é a latitude polar (GEOSOFT, 2009).

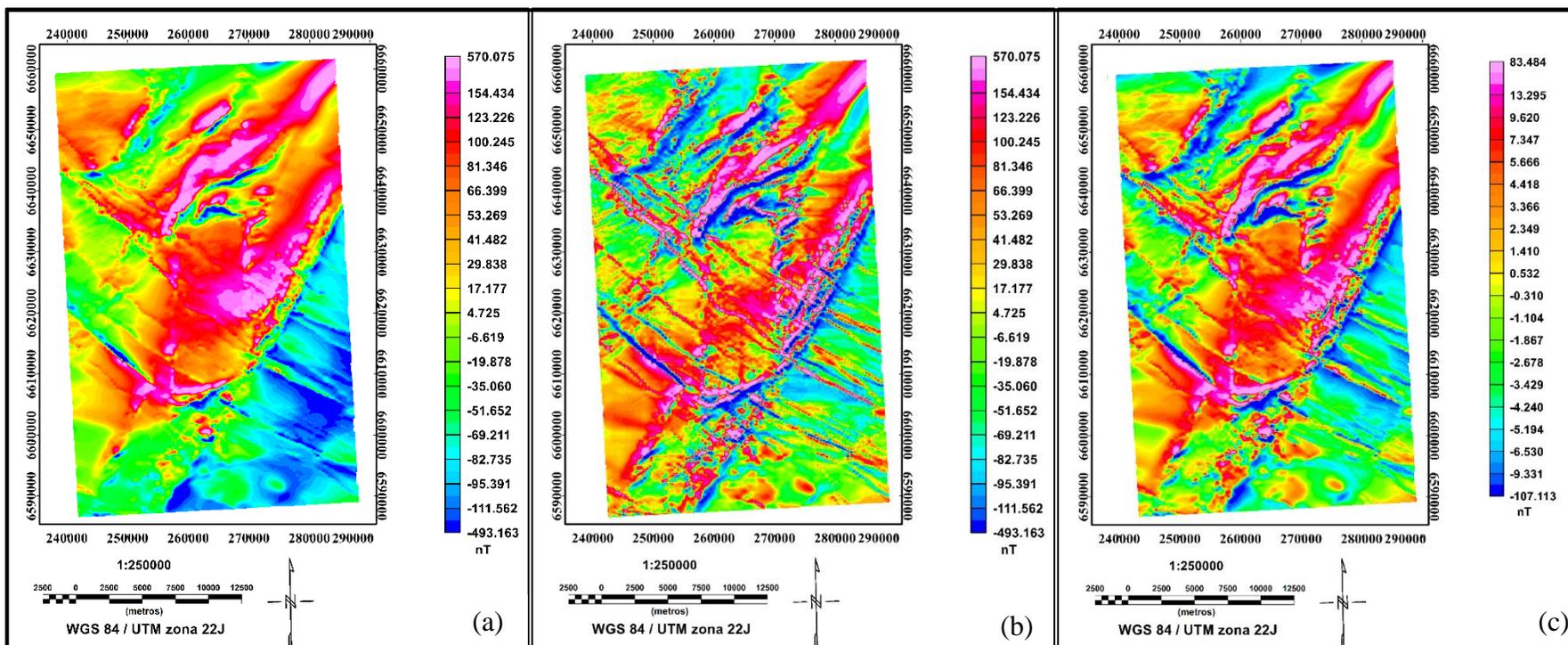
7.7 Continuação para cima

Os dados magnéticos medidos são transformados em dados medidos a uma elevação superior, enfatizando anomalias de comprimento de onda mais curtas (ao contrário). Esta continuação analítica, podem ser resolvidas no domínio do espaço ou da frequência (NABIGHAN, 2005). A continuação para cima é considerada um filtro limpo, ou suave, pois não produz efeitos de borda, nem requer a aplicação de outros filtros para corrigi-lo ou atenuá-lo (Geosoft, 2009).

$$L(r) = e^{-hr} \quad (23)$$

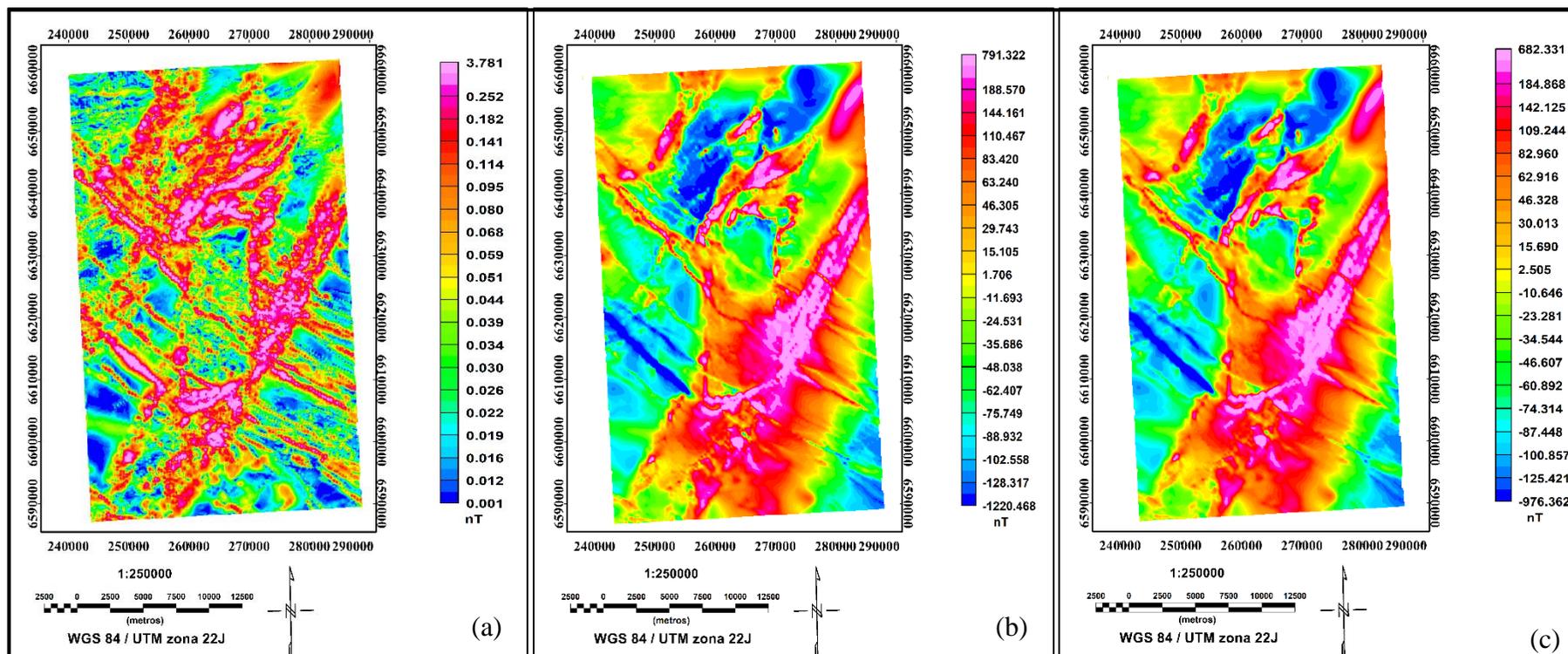
Sendo "h" a altura considerando-se o plano de medidas igual a 1 e "r" a frequência em radianos por unidade de medida (no caso m). Em levantamentos aerogeofísicos, é comum usar-se ($r = 2\pi k$), sendo k medido em ciclos/unidade de medida. Quando a altura da continuação para cima tem um valor expressivo é possível observar as assinaturas magnéticas produzidas por feições geológicas regionais. A continuação para cima (Figura 18c) é aplicada em dados aeromagnéticos para minimizar os efeitos de fontes rasas, como diques e soleiras próximas à superfície, e ressaltar as fontes mais profundas, provenientes do embasamento (REEVES, 2005).

Figura 17 – Campo Magnético Anomalo (a), Derivada horizontal (b) e Derivada vertical (c)



Fonte: autor.

Figura 18 – Amplitude do Sinal Analítico (a), Redução ao Polo (b) e Continuação para cima da Redução ao polo (c)

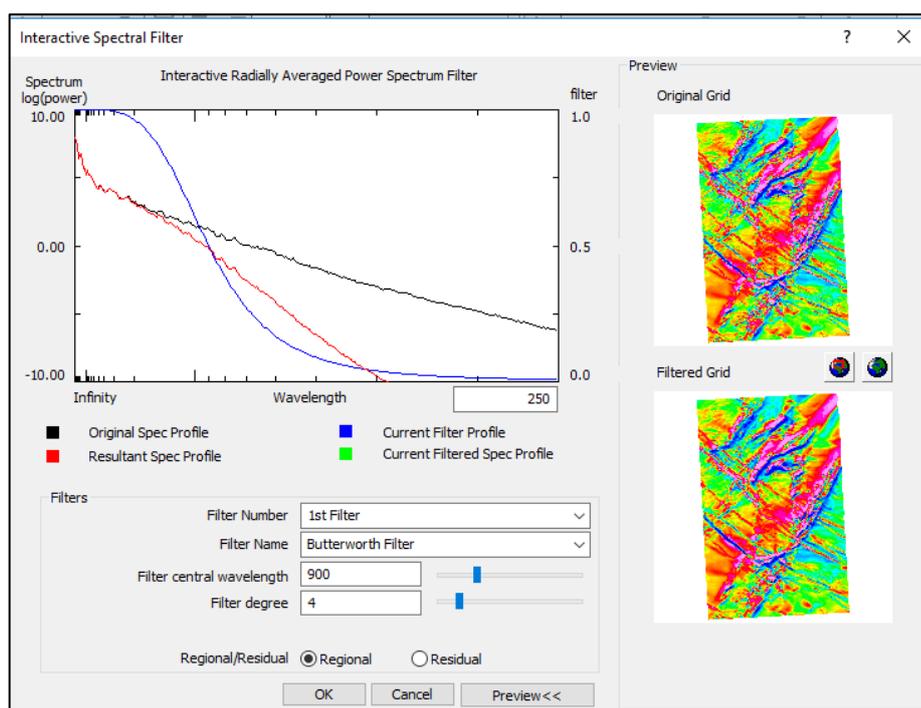


Fonte: autor.

8 RESULTADOS E ANÁLISE

O processamento das derivadas direcionais envolveu a utilização do filtro Butterworth (Figura 19) para a retirada de parte do ruído presente nos comprimentos de onda próximos da frequência de *nyquist*.

Figura 19 - Aplicação do filtro *Butterworth*. A. linha preta é o espectro de potência original e a vermelha é o espectro resultante.



Fonte: autor.

O valor de comprimento de onda que teve melhor ajuste para eliminar os ruídos foi de $\lambda=900$ km. O resultado após a filtragem produziu uma imagem da derivada horizontal mais suave e com valores levemente atenuados. A derivada vertical não necessitou da utilização de filtros já que apresentava boa resolução de imagem.

As análises dos lineamentos magnéticos foram em grande parte resolvidas nas imagens das Derivadas Direcionais e Amplitude do Sinal Analítico (Figuras 20 e 21), exibindo que estes ocorrem nas direções NW e NE. Destacam-se dois lineamentos NE que contornam o CMPF a leste e oeste. A oeste ocorre a Falha do Segredo e a leste a AMCS. Baseado nos estudos de Pereira (2011) e Costa (1997), a área do estudo poderia então ser dividida em dois domínios magnéticos: Domínio Magnético Oeste (DMO) e Domínio Magnético Central (DMC), ambos delimitados pela Anomalia Magnética Caçapava do Sul (AMCS), com um maior detalhamento

obtido através das imagens apresentadas neste trabalho (Figura 20a). O DMC apresenta o limite entre a Bacia do Camaquã com o CPMF e o DMO o limite entre a FSB com o CPMF. Nota-se que estas bacias possuem baixa intensidade magnética na imagem de Redução ao Polo e grande parte dos lineamentos magnéticos que ocorrem nessas bacias possuem direção NW.

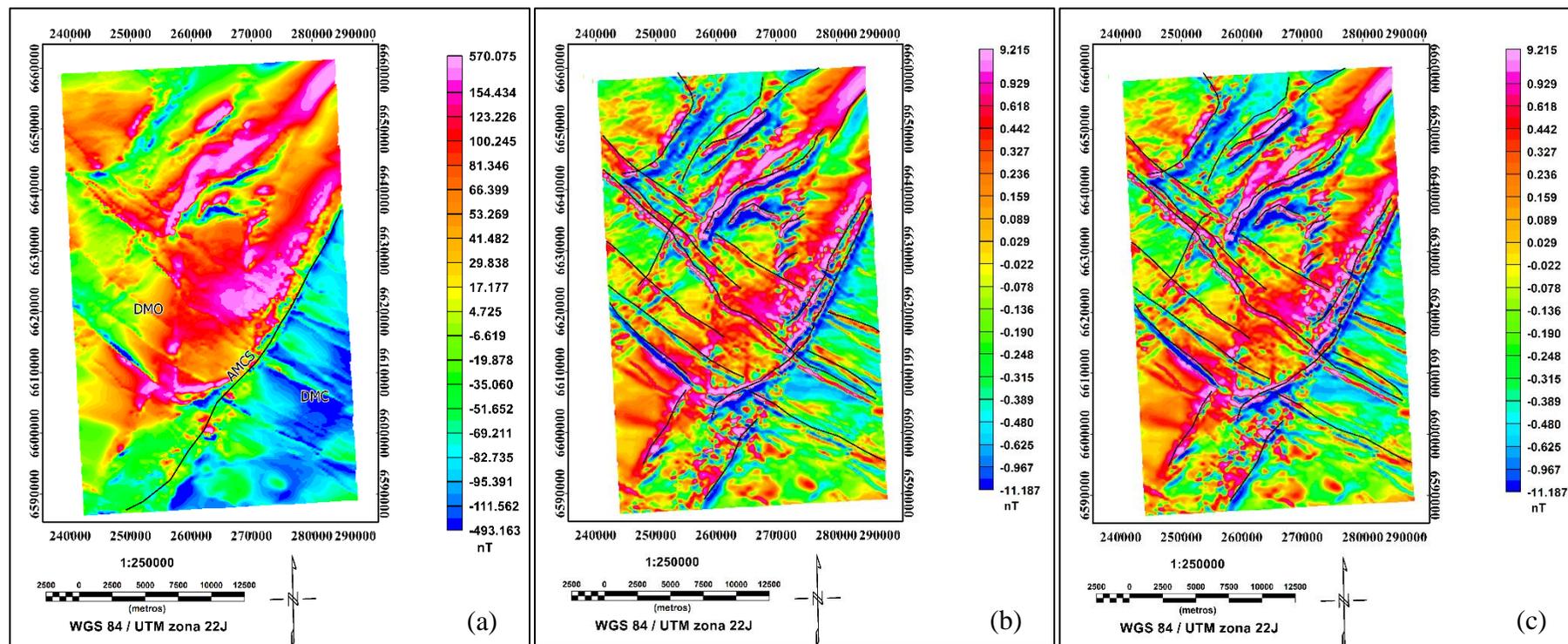
Os lineamentos magnéticos são bem representados em todos os filtros e podem ser relacionados com os lineamentos tectônicos que afetam o CPMF. O CGCS e o GBJ, assim como descrito em Gastal (2013), também podem estar associados a diques diabásicos, decorrentes do Arco de Rio Grande (ASMUS & BAISCH, 1983), que é uma grande estrutura do embasamento do ESRG e da Bacia do Paraná.

As imagens filtradas a partir do Campo Magnético Anômalo também permitem observar uma relação entre as anomalias magnéticas e os contatos do CGCS com o CPMF, bem como o limite marcado pelo contato entre o Complexo Granito São Sepé (CGSS) com os basaltos da Formação Hilário (Figuras 22 e 23).

As Formações Sedimentares Santa Bárbara, Arroio dos Nobres e Varzinha também aparecem com os limites bem demarcados pelas anomalias magnéticas e coincidem com os lineamentos magnéticos NE-SW, com a Falha do segredo e com a AMCS. Isto mostra que os o CGCS e o CPMF estão entre duas bacias sedimentares, marcadas por baixos valores de intensidade magnética (Figuras 24 e 25).

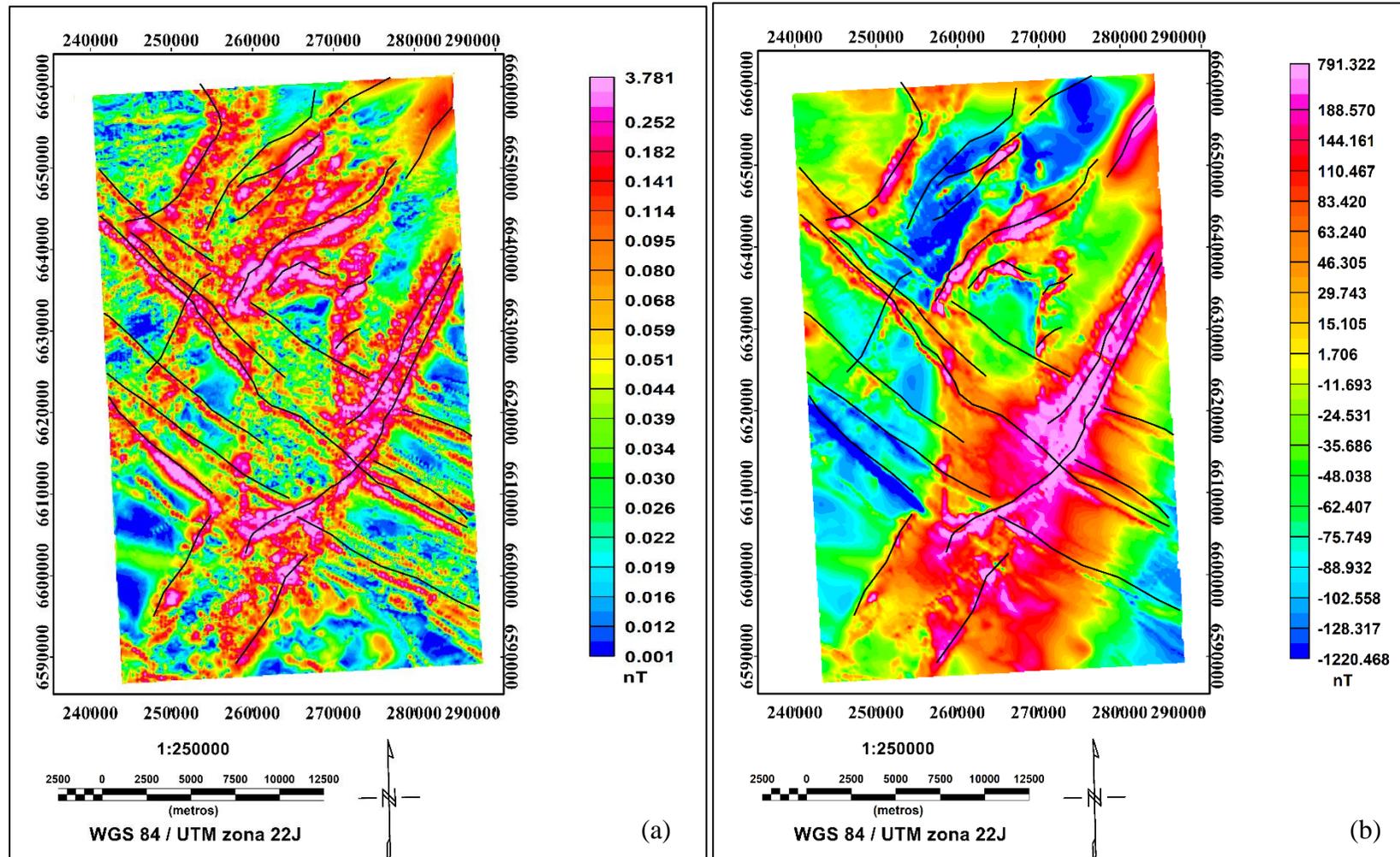
Através da análise do espectro de potência da continuação para cima da redução ao Polo (Figura 26) para uma altura de 50 km foram obtidas as profundidades médias do topo das anomalias magnéticas da área de estudo. O topo das fontes mais profundas encontra-se em aproximadamente 6 km de profundidade, com o topo das fontes médias entre 3 e 5 km e o topo das fontes rasas entre 1 a 2 km de profundidade.

Figura 20 – (a) Campo Magnético Anômalo, dividido em DMO e DMC pela AMCS; (b) Derivada horizontal; e (c) Derivada Vertical com lineamentos magnéticos.



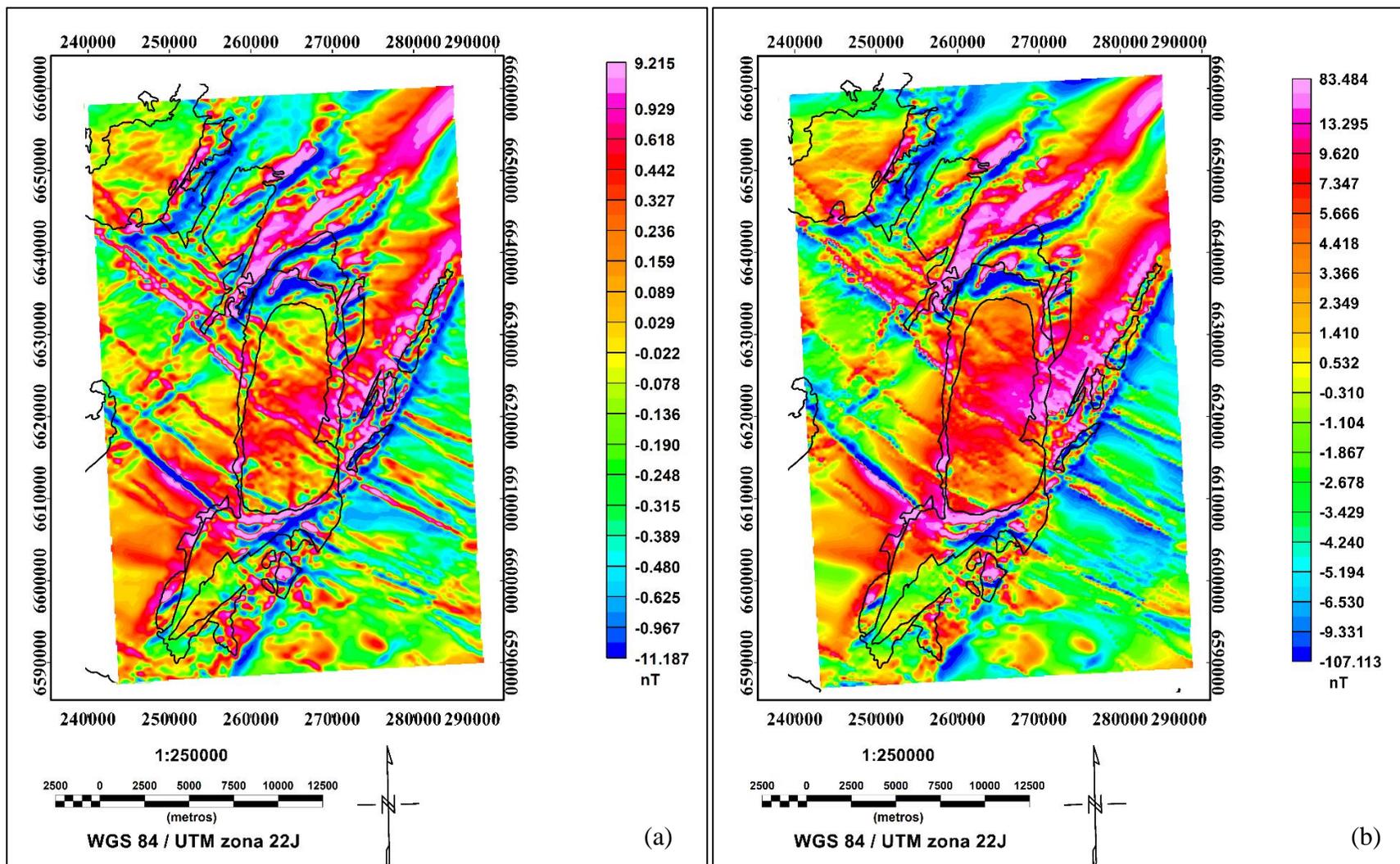
Fonte: autor.

Figura 21 – (a) Amplitude do Sinal Analítico; e (b) Redução ao Polo, com lineamentos magnéticos.



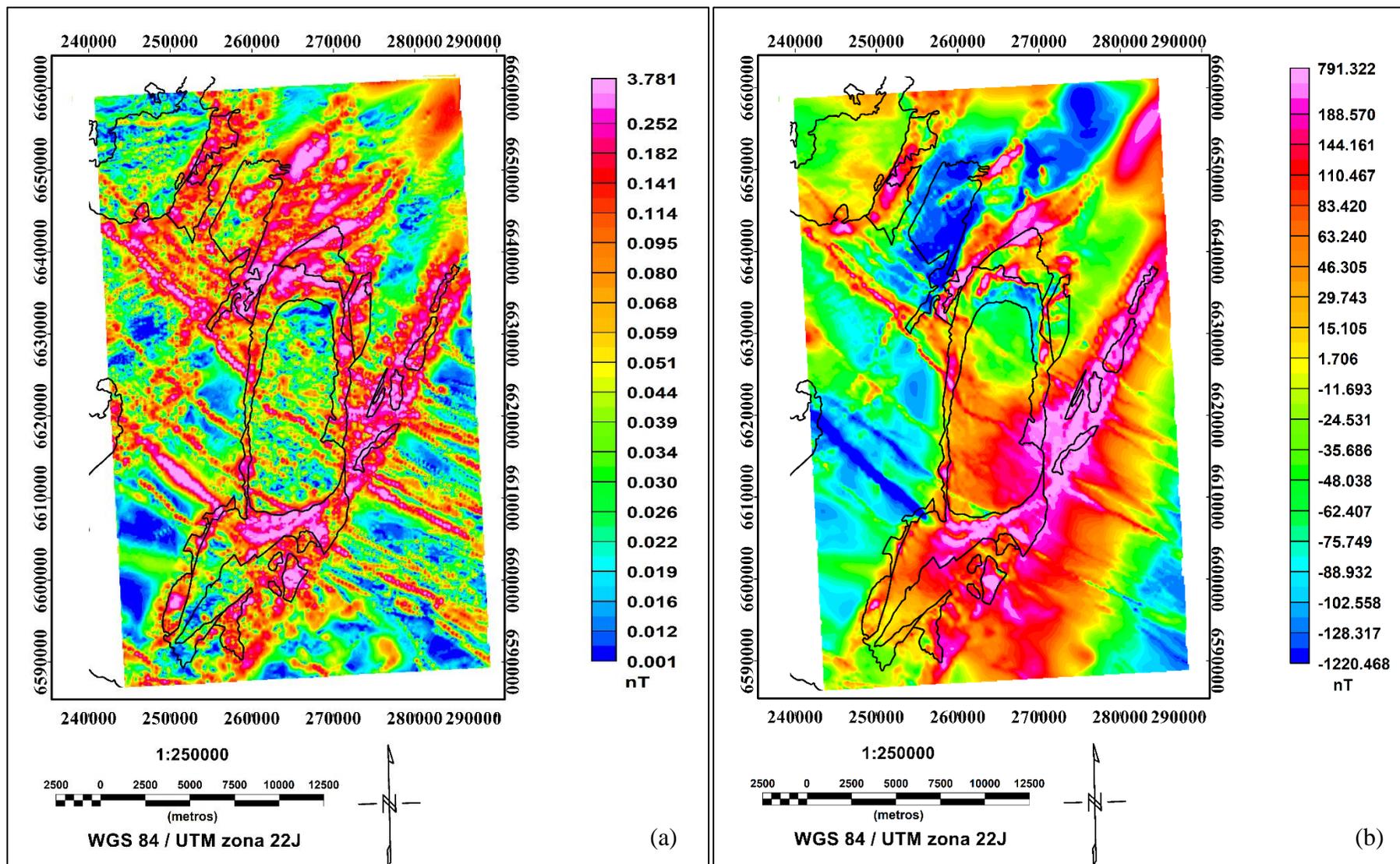
Fonte: autor.

Figura 22 – (a) Derivada horizontal; e (b) Derivada vertical, com polígonos da geologia local (CGCS, CMPF e basaltos da Formação Hilário).



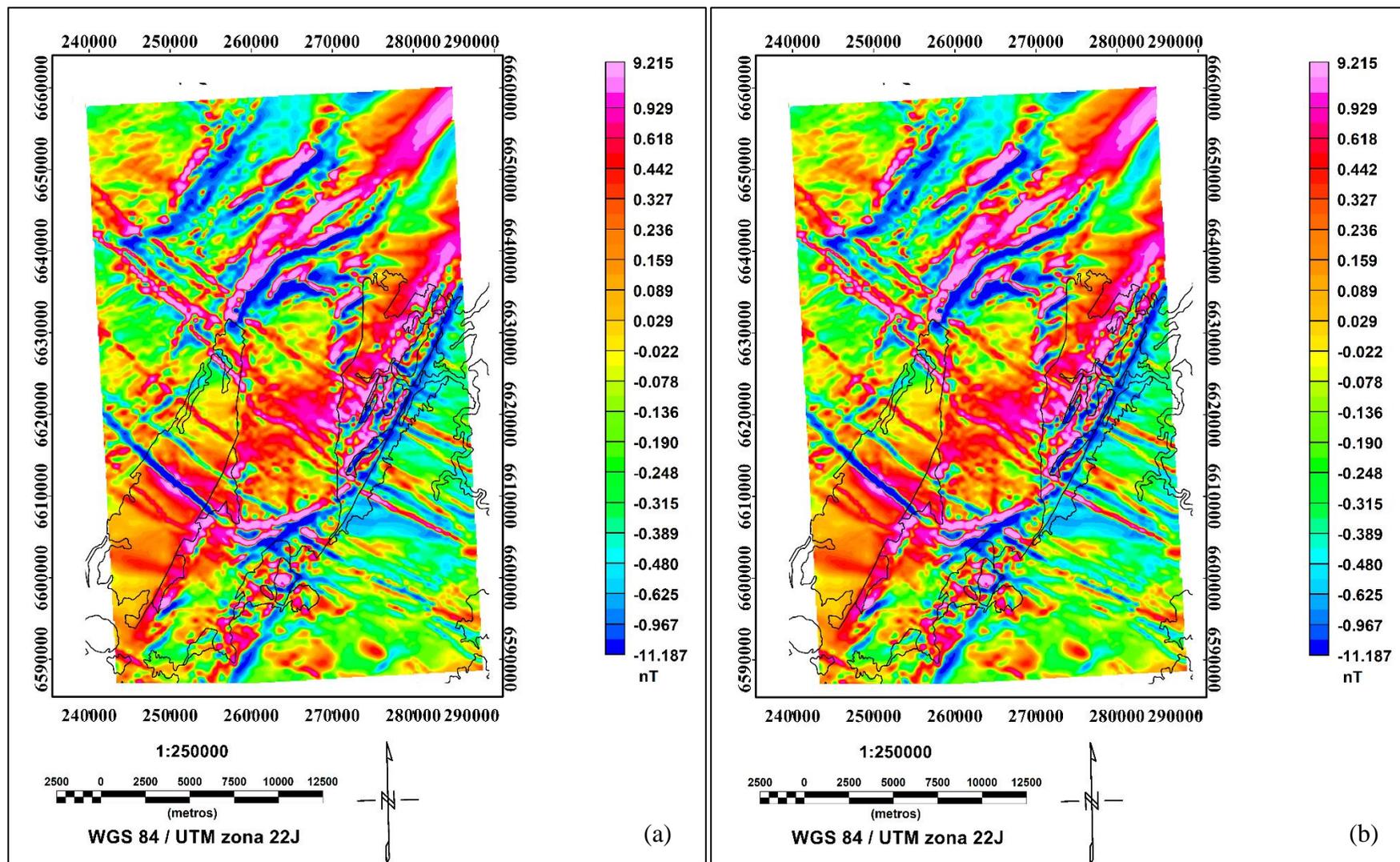
Fonte: autor.

Figura 23 - (a) Amplitude do Sinal Analítico; e (b) Redução ao Polo, com polígonos da geologia local (CGCS, CMPF e basaltos da Formação Hilário).



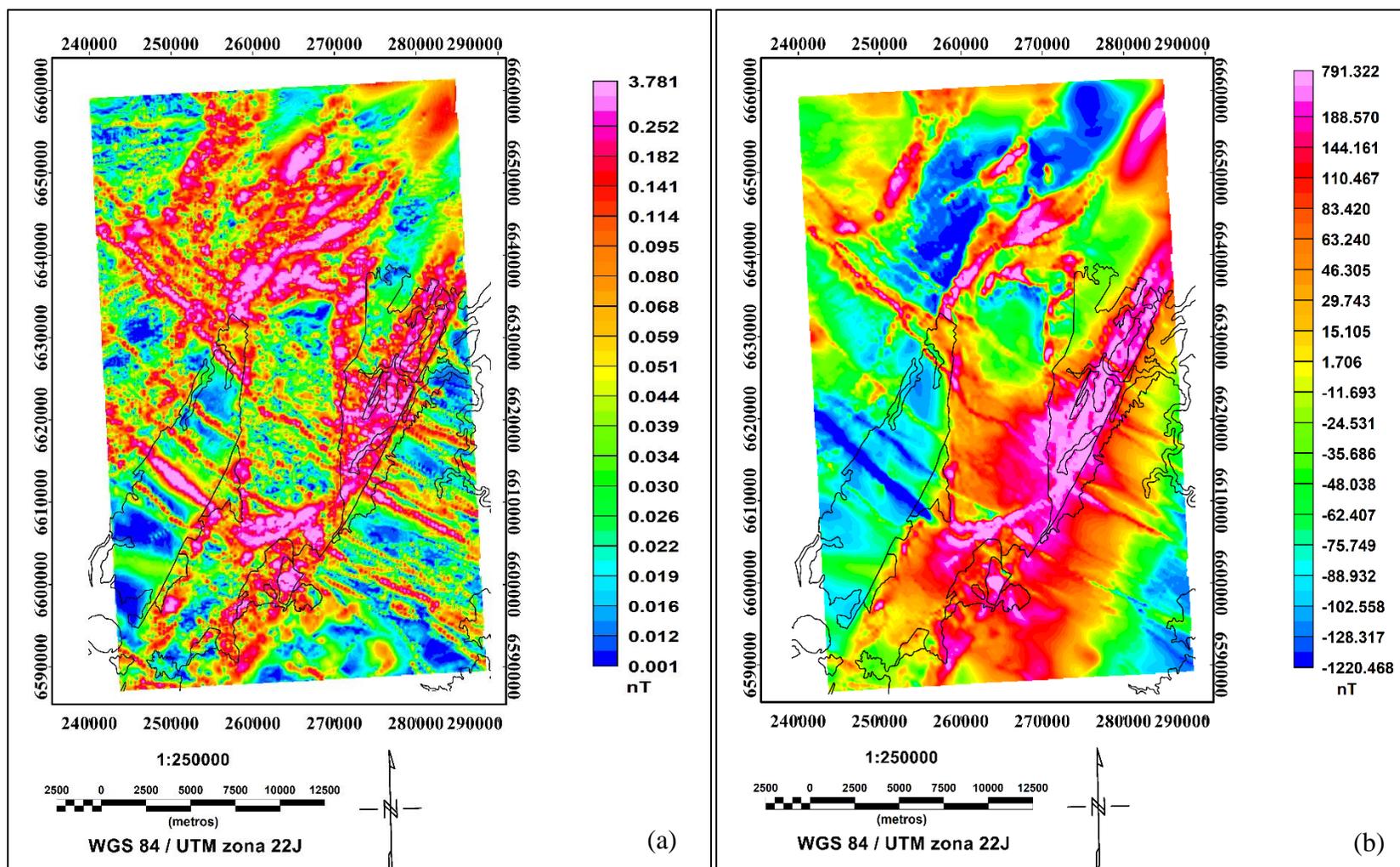
Fonte: autor.

Figura 24 - (a) Derivada horizontal; e (b) Derivada Vertical, com polígonos da geologia local (Fomação Santa Bárbara, Arroio dos Nobres e Varzinha).



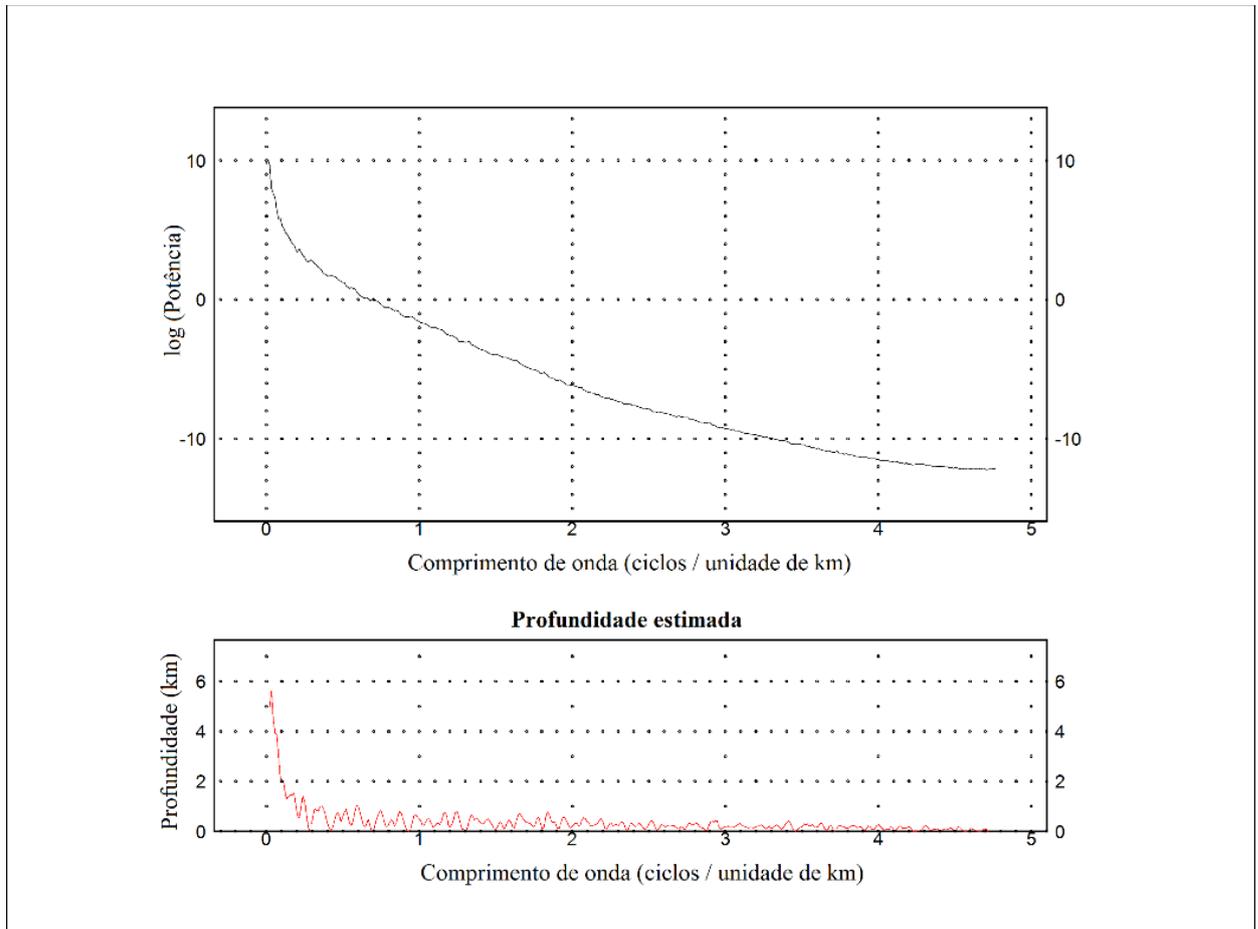
Fonte: autor.

Figura 25 - (a) Derivada horizontal; e (b) Derivada Vertical, com polígonos da geologia local (Fomação Santa Bárbara, Arroio dos Nobres e Varzinha).



Fonte: autor.

Figura 26 – Espectro de potência do filtro de continuação para cima da RTP, mostrando o topo das fontes anômalas em profundidade.



Fonte: autor.

9 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- As imagens obtidas do processamento do *grid* dos dados aeromagnéticos possibilitaram a identificação dos contatos litológicos de forma mais acurada, o que pode servir de auxílio para o melhoramento de mapas pré-existentes;
- As derivadas direcionais apresentam intensidades magnéticas diferenciadas, tendo a derivada vertical as maiores intensidades, podendo estabelecer que possivelmente os lineamentos magnéticos possuem uma maior variação em profundidade do que lateral. Isto aponta que as fontes anômalas são pontuais e profundas e possuem em média 6 km

de profundidade, podendo este ser um primeiro parâmetro da subsuperfície para os futuros estudos geofísicos e geológicos;

- O CMPF e o CGCS estão entre duas bacias sedimentares. Estas possuem valores de baixa intensidade magnética e de sinal negativo na imagem de Redução ao Polo. Provavelmente podem estar associadas aos processos de alteração hidrotermal que podem ter alterado o sentido da magnetização dos minerais presentes nestas formações;
- O entorno do CGCS e do CMPF é o local onde encontram-se as maiores intensidades magnéticas e positivas, o que pode ser um indicativo de presença de minerais ferromagnéticos, corroborando com os estudos mineralógicos;
- Em geral os lineamentos magnéticos apresentam associação com as falhas e estruturas tectônicas de possível potencial à ocorrência de mineralizações de metais base, valendo futuramente um estudo mais detalhado das mesmas.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASMUS, Haroldo E.; BAISCH, Paulo R. Geological evolution of the Brazilian continental margin. Episodes, v. 4, p. 3-9, 1983.

ALMEIDA, Renato Paes de. Evolução tectono-sedimentar da Formação Santa Bárbara na Sub-bacia Camaquã ocidental, RS. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP). Instituto de Geociências.

ARYAMANESH, Mohammad; MOHSENI, Peyman; MOHALLEH, Hassan Alizadeh Salo. Detection of Magnetic Lineaments within Dena City, Kohgiluyeh-And-Boyerahmad Province, Western Iran. 2016.

BICCA, MARCOS MÜLLER. Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã-RS. 2013. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS.

BITENCOURT, M. F. Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS: geologia e relações com o corpo granítico. Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, v. 1, p. 37-48, 1983.

BLAKELY, Richard J. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, 1996.

BORBA, Andre Weissheimer de; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel. Significado tectônico dos depósitos de leques aluviais da Formação Santa Bárbara (Eo-Paleozóico) na região de Caçapava do Sul (RS, Brasil). Pesquisas em Geociências. Porto Alegre, RS. Vol. 29, n. 1 (2002), p. 31-41, 2002.

BORBA, André Weissheimer. Evolução geológica da “Bacia do Camaquã”(Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica. 2006. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS.

BORBA, Andre Weissheimer de; MARASCHIN, Anderson José; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel. Evolução tectono-estratigráfica e paleoclimática da Formação Maricá (Escudo Sul-rio-grandense, Brasil): um exercício de geologia histórica e análise integrada de uma bacia sedimentar neoproterozóica. Pesquisas em Geociências. Porto Alegre, RS. Vol. 34, n. 2 (2007), p. 57-74, 2007.

Brigham, E. (1974) The fast Fourier transform, Prentice Hall Inc.

GCAR, Grupo de Controle e Automação, <http://www.ece.ufrgs.br/>. Fonte: GCAR ufrgs: <http://www.ece.ufrgs.br/~eng04006/aulas/aula23.pdf>, Aplicações de Filtros .(11 de 2016)

CHEMALE JR., F. 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Ed.). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, CIGO, Instituto de Geociências-UFRGS. p. 13-54.

CPRM – serviço geológico Do Brasil. Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul. LASA PROSPECÇÕES S.A., Relatório Técnico, 260 p, 2010.

COSTA, A. F. U. Teste e modelagem geofísica da estruturação das associações litotectônicas pré-Cambrianas no Escudo Sul-rio-grandense. Teste e modelagem geofísica da estruturação das associações litotectônicas pré-cambrianas no Escudo Sul-Rio-Grandense, v. 2, 1997.

DE ALMEIDA, Fernando Flávio Marques; CARNEIRO, Celso Dal Ré; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel. Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes. Brazilian Journal of Geology, v. 26, n. 3, p. 125-138, 1996.

DOBRIN, M. SAVIT. Introduction to Geophysical Prospecting.1988.

FERREIRA, Marcos Vinícios; ROSALES, Mario Jesus Tomas. Processamento e integração de dados magnetométricos terrestres e aéreos: uma correlação com dados de susceptibilidade magnética aplicados ao mapeamento geológico na região de Vila Nova do Sul-RS. 2013.

GASTAL, MARIA DO CARMO et al. REINTERPRETAÇÃO DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL, RS, DE ACORDO COM OS SISTEMAS VULCANO-

PLUTÔNICOS DE SUBSIDÊNCIA. Revista Brasileira de Geologia Maria do Carmo Gastal et al, v. 36, n. 01, p. 99-113, 2006.

GASTAL, M.C.P. & FERREIRA, F. J. F. Discussão dos processos de construção do complexo granítico São Sepé, RS: feições geológicas e petrográficas. Pesquisas em Geociências. Porto Alegre, v. 3, n. 40, p. 233-257, 2013.

GEOSOFT, INCORPORATED. Montaj MAGMAP filtering; 2 – D frequency domain of potential field data extension for Oasis Montaj v.6.1. Toronto, Ontario, Canadá, 1999.

Geosoft, INCORPORATED. Montaj GRAV/MAG Interpretation, User guide and tutorial, Toronto, Ontario, Canada. 2009

GOMES, Gustavo R.; SATO, Hedison K. Tratamento De Dados Aeromagneticos Do Vale Do Rio Curaca Na Bahia. In: 6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 1999.

LUIZ, Jose Gouvea; E SILVA, Lúcia Maria da Costa. Geofísica de prospecção. Editora Universitária UFPA, 1995.

LUYENDYK, A. P. J. Processing of airborne magnetic data. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, p. 31-38, 1997.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, F.; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Precambriano. Ianuzzi R. & Frantz JC.(Org.), v. 50, p. 97-123, 2007.

HARTMANN, Leo A.; LOPES, William R.; SAVIAN, Jairo F. Integrated evaluation of the geology, aerogammaspectrometry and aeromagnetometry of the Sul-Riograndense Shield, southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 88, n. 1, p. 75-92, 2016.

JANIKIAN, Liliane et al. Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozóico III) em sua área-tipo: litoestratigrafia, evolução paleoambiental e contexto tectônico. *Brazilian Journal of Geology*, v. 33, n. 4, p. 349-362, 2003.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. *Geofísica de exploração*. Oficina de Textos, 2009.

LEINZ, Viktor; BARBOSA, A. F.; TEIXEIRA, E. A. Mapa geológico, Caçapava-Lavras: Rio Grande do Sul. *Min. Metalurgia*, v. 5, n. 30, p. 252-258, 1941.

LIMA, E. F.; SOMMER, C. A.; NARDI, L. V. S. O vulcanismo neoproterozóico-ordoviciano no Escudo Sul-riograndense: os ciclos vulcânicos da Bacia do Camaquã. Iannuzzi R. & Frantz JC (eds.), v. 50, p. 79-95, 2007.

LOWRIE, William. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press, 2007.

LUIZ, Jose Gouvea; E SILVA, Lúcia Maria da Costa. *Geofísica de prospecção*. Editora Universitária UFPA, 1995.

MILLIGAN, P. R.; GUNN, P. J. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 63-75, 1997.

NABIGHIAN, Misac N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, n. 3, p. 507-517, 1972.

NABIGHIAN, Misac N. et al. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, v. 70, n. 6, p. 33ND-61ND, 2005.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; JUNIOR, Farid Chemale; WILDNER, Wilson. Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). *Ciência e Natura*, v. 36, p. 183, 2014.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R.; CHEMALE JR, F. A Geração dos granitóides Neoproterozóicos do Batólito Pelotas: evidências dos isótopos de Sr e Nd e implicações para o crescimento continental da porção sul do Brasil. *Ianuzzi R. & Frantz JC (org.)*, v. 50, p. 59-77, 2007.

PORCHER, Carlos Alfredo; LOPES, Ricardo da Cunha. Relatório folha Cachoeira do Sul SH. 22-Y-A. 2000.

RAMOS, Lara Nigro Rodrigues Alves. Dados gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos aplicados ao mapeamento geológico e à exploração de ouro na região de Fazenda Nova, porção leste do arco magmático de Arenópolis, Goiás. 2011.

REEVES, Colin. Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation. Course unit i, v. 50, 2005.

REMUS, M. V. D.; Hartmann, L. A.; McNaughton, N. J. & Fletcher, I. R. 1999. SHRIMP U-Pb zircon ages of volcanism from the São Gabriel Block, southern Brazil, In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 1., 1999. Gramado, Boletim..., Porto Alegre, UFRGS, p. 83.

REMUS, M. V. D. et al. Distal magmatic-hydrothermal origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) deposits, southern Brazil. *Gondwana Research*, v. 3, n. 2, p. 155-174, 2000.

REYNOLDS, John M. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, 2011.

Ribeiro, M., Bocchi, P.R., Figueiredo Filho, P.M. & Tessari, R.I. 1966. Geologia da quadrícula de Caçapava do Sul, RS. *Boletim do Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia*, 127, 232 p.

ROBERTSON, J. F. Revision of Stratigraphy and nomenclature of rock units in Caçapava-Lavras Region. *Notas e estudos*, v. 1, n. 2, p. 41-54, 1966.

ROCHA, José Antonio. Limites geográficos de todos os 5566 municípios brasileiros no Google Earth. 2012.

ROCHA, José Antonio. Todo o sistema viário brasileiro no Google Earth. 2014.

ROEST, Walter R.; VERHOEF, Jacob; PILKINGTON, Mark. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, v. 57, n. 1, p. 116-125, 1992.

TELFORD, William Murray; GELDART, Lloyd P.; SHERIFF, Robert E. Applied geophysics. Cambridge university press, 1990.

SAALMANN, K.; REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A. Geochemistry and crustal evolution of volcano-sedimentary successions and orthogneisses in the Sao Gabriel Block, southernmost Brazil—relics of Neoproterozoic magmatic arcs. *Gondwana Research*, v. 8, n. 2, p. 143-161, 2005.

SANTOS, Roberto Paulo Zanon dos. Análise multivariada de dados aerogamaespectrométricos, aeromagnéticos e sensoriamento remoto como auxiliar na prospecção de minerais metálicos na região da Bacia do Camaquã-RS. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014.

SORDI, Diogo Alves de. Aerogeofísica aplicada à compreensão do sistema de empurrões da sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil central. 2007.

TRAVASSOS, Rodrigo Piraine. Interpretação estrutural regional do escudo sul-rio-grandense-Rio Grande do Sul-Brasil, com base em aeromagnetometria. 2015.

WHITHAM, Kenneth. Measurement of the geomagnetic elements. In: *Methods and Techniques in Geophysics*, Volume 1. 1960. p. 104.