



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**SIEGBERT ROOS**

**GAMASPECTROMETRIA E MAGNETOMETRIA APLICADOS À  
DETERMINAÇÃO DE NOVOS ALVOS DE EXPLORAÇÃO MINERAL NA REGIÃO  
DE AMARAL FERRADOR – RS, PORÇÃO LESTE DO CINTURÃO DOM  
FELICIANO**

Porto Alegre, 2017.

**SIEGBERT ROOS**

**GAMASPECTROMETRIA E MAGNETOMETRIA APLICADOS À  
DETERMINAÇÃO DE NOVOS ALVOS DE EXPLORAÇÃO MINERAL NA REGIÃO  
DE AMARAL FERRADOR – RS, PORÇÃO LESTE DO CINTURÃO DOM  
FELICIANO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia junto a Disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientador:** Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

**Coorientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Juliana Charão Marques

Porto Alegre, 2017

## **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**Vice-Reitor:** Jane Fraga Tutikian

## **INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Roos, Siegbert

Gamaespectrometria e magnetometria aplicados à determinação de novos alvos de exploração mineral na região de Amaral Ferrador – RS, porção leste do Cinturão Dom Feliciano. / Siegbert Roos. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017.

[117 f.] il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientador(es): Jairo Francisco Savian

Coorientadora: Juliana Charão Marques

1. Gamaespectrometria. 2. Magnetometria. 3. Depósitos Epitermais.  
4. Modelamento Geofísico. 5. Prospecção Mineral. I. Título.

CDU 55(816.5)

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Instituto de Geociências**  
**Curso de graduação em Geologia**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho de Conclusão de curso intitulado “GAMAESPECTROMETRIA E MAGNETOMETRIA APLICADOS À DETERMINAÇÃO DE NOVOS ALVOS DE EXPLORAÇÃO MINERAL NA REGIÃO DE AMARAL FERRADOR – RS, PORÇÃO LESTE DO CINTURÃO DOM FELICIANO” elaborado por Siegbert Roos, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão examinadora:**

Prof. Dr. Leonardo Cardoso Renner

---

Prof. Dra. Silvana Bressan Riffel

---

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa

---



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família, principalmente ao meu tio Jasson pelo apoio no início dos estudos, e a minha mãe e irmão por toda ajuda na minha decisão de trocar o trabalho pelos estudos em uma época difícil. Em especial para a minha mãe por todos estes anos de dedicação com a nossa família.

A todas as pessoas fantásticas que conheci durante estes anos de Geologia. Principalmente aos amigos que vou levar para a vida: Rudi e Cris, Thiago Honório (Caiçara que me apresentou à geologia e à minha noiva), minha noiva Aline. A minha querida amiga Diana Celis por toda a ajuda no inglês, e por todas as conversas, conselhos e músicas. És uma das melhores coisas que a geologia me trouxe, e também fazes parte da minha vida.

Quero também fazer um agradecimento especial a todos que colaboraram com este trabalho. Ao geólogo João Angelo Toniolo e ao geofísico William Lopes, ambos da CPRM que emprestaram o magnetômetro para o trabalho, especialmente ao William que prontamente me enviou materiais, artigos, tutoriais e sempre na medida do possível buscou sanar minhas dúvidas. Ao meu orientador Jairo pelo recebimento de braços abertos no início deste projeto e por todo o apoio durante a elaboração do trabalho, desde o campo até a elaboração da monografia. A minha orientadora Juliana pelo auxílio na construção das linhas de geofísica e pelos três anos de aprendizado como seu bolsista. A geofísica Carolina pelo apoio e dedicação no trabalho de campo. Ao nosso querido motorista no campo, Claudinho. Que sorte ter conhecido pessoa de tamanha bondade, e com um excelente gosto musical.

A minha família que me adotou nestes anos: Roni, Jack, Mozart e Aline. Obrigado por todo o amor que me têm dado neste tempo. O apoio de vocês foi fundamental nesta jornada.

Por fim quero agradecer a minha querida companheira Aline. Quis a vida que nos conhecêssemos na geologia. Obrigado minha Xú, meu amor, pela dedicação e suporte, sempre incondicionais que me deste durante todos estes anos. Sei que agora é apenas o início de nossas vidas, mas é muito bom que seja contigo.

*“Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros ou TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser; que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver”.*

*Amyr Klink*

## RESUMO

Os métodos geofísicos visam a identificação indireta de litologias em subsolo através das propriedades físicas das rochas. No entanto, a aplicação da geofísica na prospecção mineral ainda é escassa no Brasil. A Mina Galena, na região de Amaral Ferrador, sudeste do Rio Grande do Sul, é caracterizada como um depósito epitermal de baixa sulfetação. Trabalhos anteriores sugeriram que se trata de um sistema raso com mineralização hospedada em um Monzogranito heterogêneo e com possível contribuição térmica do Riolito Porfírico Cerro Grande, situado ao sul da Mina. A partir disto foi feita análise aerogeofísica na região através dos métodos de gamaespectrometria e magnetometria, e, verificada a necessidade de uma maior resolução, foi realizado o levantamento terrestre com as mesmas técnicas. Após o processamento dos dados e baseado na análise dos mapas de campo magnético total em conjunto com o mapa ternário de composição colorida RGB, foi possível separar a área em domínios distintos, no qual os domínios radiométricos A, B e C equivalem ao domínio magnético A que se trata de uma área com magnetização baixa a intermediária e altos valores de potássio e também onde se encontram os focos de alteração hidrotermal vistos no mapa de Fator  $F$ . O domínio magnético D corresponde ao domínio radiométrico C, com alto valor de  $eTh$  e altíssima magnetização, na região sul da área, representada pelo Riolito Porfírico Cerro Grande. A análise do conjunto de filtros gerados em cima dos dados magnéticos proporcionou a identificação de outras cinco regiões de interesse prospectivo: três de fontes rasas e duas mais profundas. A análise do espectro de potencia radial sugere que os focos rasos estejam em um intervalo de 20 a 35 metros e os profundos a 65 metros. Ao final foi construído um modelo geofísico da área o qual permitiu visualizar os focos anômalos sendo possível determinar a posição e orientação destas fontes anômalas e ainda identificar prováveis canais de alimentação do Riolito Porfírico na porção leste da área. Isto corrobora as hipóteses dos trabalhos anteriores de que o Riolito poderia ter contribuído para a introdução dos fluidos do sistema de mineralização de Amaral Ferrador sendo também possível fonte de energia térmica deste sistema.

**Palavras-Chave:** Gamaespectrometria, Magnetometria, Depósitos Epitermais, Modelamento Geofísico, Prospecção Mineral.

## Abstract

The geophysical methods aim at the indirect identification of underground lithologies through the physical properties of rocks. However, the application of geophysics in mineral prospecting is still scarce in Brazil. The Galena Mine, in the region of Amaral Ferrador, southeast of Rio Grande do Sul, is characterized as a low sulfidation epithermal deposit. Previous studies have suggested that it is a shallow system with mineralization hosted in a heterogeneous Monzogranite with a possible thermal contribution of Cerro Grande Porphyritic Riolite, located in the south of the Mine. Based on that, aero-geophysical analysis was performed in the region through the methods of gamma spectrometry and magnetometry and verified the need for a higher resolution, the ground survey was carried out using the same techniques. After the data processing and based on the analysis of the magnetic Total Field maps together with the ternary RGB map color composition, it was possible to split the area into distinct domains in which the radiometric domains A, B and C correspond to the magnetic domain A which is an area with low to intermediate magnetization and high post-grade values and where the hydrothermal alteration is seen in the map of Fator  $F$ . The magnetic domain D corresponds to the radiometric domain C, with high  $eTh$  value and very high magnetization, in the southern region of the area, represented by Cerro Grande Cerro Riolite. The analysis of the set of filters generated on magnetic data allowed the identification of five other regions of prospective interest: three of shallow sources and two of deeper ones. The study of the radial power spectrum averally suggests that the outbreaks are in an interval of 20 to 35 meters and the deep ones to 65 meters. Finally, a geophysical model of the area was constructed that allowed to visualize the anomalous points, being possible to determine the position and orientation of the anomalous sources and it was also possible to identify probable Porfiritic Riolito mineralized feeder channels in the eastern portion of the area. This corroborates the hypotheses of the previous works that the Riolito could have contributed to the introduction of the fluids of the system of mineralization of Amaral Ferrador being also the possible source of thermal energy of this system.

**Key-words:** Gamma spectrometry, Magnetometry, Epithermal Deposits, geophysical modeling, Mineral Prospecting.

## Lista de Figuras

Figura 1: Localização da área de estudo. ....	16
Figura 2: Área do Projeto Aerogeofísico no Escudo Sul-Riograndense .....	18
Figura 3: Mapa de anomalia Bouguer para o ESRG. ....	23
Figura 4: Mapa Geológico da região de estudo.....	24
Figura 5: Mapa Geológico da região de Amaral Ferrador.. ....	26
Figura 6: Ilustração mostrando posição, processos e mineralização em depósitos epitermais de alta e baixa sulfetação .....	28
Figura 7: As componentes geomagnéticas. ....	38
Figura 8: Utilização do Gamaespectrômetro. ....	55
Figura 9: A - Magnetômetro itinerante em uso. B - Magnetômetro base em uso. ....	57
Figura 10: Canal do Potássio (%) da região amplificada da área de estudo.....	70
Figura 11: Seção aerogamaespectrométrica mostrando a mudança na percentagem de Potássio na região da Mina Galena.. ....	71
Figura 12: Mapa com os 155 pontos do levantamento terrestre e a localização da antiga cava da Mina Galena.....	72
Figura 13: Composição RGB para a área de estudo, com a divisão em três domínios radiométricos.....	74
Figura 14: Mapas radiométricos. A - Contagem Total (CT); B – Potássio (K); C – Urânio (eU); D – Tório (eTh). ....	76
Figura 15: Razões radiométricas. A - Th/K. B - U/K. C - U/TH.....	78
Figura 16: Mapa do Fator F. Os contornos delimitados pela linha preta realçam os principais domínios hidrotermais.....	79
Figura 17: Mapa aeromagnético de campo total (nT) reduzido do IGRF.. ....	82
Figura 18: Seção aeromagnetométrica com mapa da CT (nT) reduzido do IGRF. ...	83
Figura 19: Mapas magnéticos da região. A - Campo Anômalo Total; B - Redução ao Polo; C - Continuação para cima.....	85
Figura 20: Espectro de potência radial mostrando intensidades magnéticas com 35 e 65 metros. ....	86
Figura 21: Mapas da Primeira derivada com realce de intensidade.....	88
Figura 22: Mapas da Segunda derivada com realce de intensidade.....	89
Figura 23: Mapas da derivada de ordem 0,5 com realce de intensidade .....	90

Figura 24: Mapas de intensidade de respectivamente: A - Amplitude do Sinal Analítico. B - Inclinação do Sinal Analítico. C - Gradiente Horizontal Total.....	93
Figura 25: Mapas de intensidade respectivamente do: A - Gradiente Horizontal Total do Sinal Analítico. B - Inclinação do Sinal Analítico com Gradiente Horizontal Total. ....	94
Figura 26: Anomalia Magnética Residual, com base nos dados de Campo Total.....	95
Figura 27: Modelo Geofísico mostrando grande faixa anômala ao sul no chamado Cerro Grande. ....	96
Figura 28: Modelo Geofísico 3D evidenciando as faixas anômalas de maior interesse. ....	97
Figura 29: Modelo Geofísico 3D. Corte em sequência ao longo do eixo Y mostrando a evolução das faixas anômalas. ....	98
Figura 30: Modelo Geofísico 3D. Corte dos valores anômalos.. ....	100
Figura 31: Mapas de contorno das anomalias.....	102
Figura 32: Primeira derivada em x, y e z. ....	104
Figura 33: Segunda derivada em x, y e z. O .....	105
Figura 34: Derivada de ordem 0,5 em x, y e z.....	106
Figura 35: A – Amplitude do Sinal Analítico. B – Inclinação do Sinal Analítico. C – Gradiente Horizontal Total.....	108
Figura 36: A – Gradiente Horizontal Total com Inclinação do Sinal Analítico. Os traços amarelos mostram as regiões de maior interesse. B – Inclinação do Sinal Analítico com Gradiente Horizontal Total.....	110
Figura 37: A – Integração dos dados com a inferência dos locais de maior interesse prospectivo com base nos mapas radiométricos, magnetométricos e do modelo geofísico 3D. B – Sobreposição das áreas de interesse no mapa magnético de Campo Total. C – Sobreposição das áreas de interesse no mapa de Fator F. As elipses de cor preta representam fontes rasas. As elipses de cor cinza representam fontes profundas. ....	112

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Cronograma de execução deste trabalho.....	21
Tabela 2: Características dos depósitos epitermais do tipo alta e baixa sulfetação. Extraído de White & Hedenquist (1995), e Hedenquist (2000).....	29
Tabela 3: Aplicações de levantamentos geofísicos. G, gravimétrico; M, magnético; S, sísmico; E, resistividade elétrica; PE, potencial espontâneo; PI, polarização induzida; EM, eletromagnético; R, radiométrico; Rd, radar de penetração no solo. Extraído de Kearey (2009). ....	31
Tabela 4: Minerais radioativos e suas respectivas ocorrências (modificado de Kearey 2009). ....	32
Tabela 5: Concentração média de radioelementos em rochas ígneas. Modificado de Silva (2010). ....	33
Tabela 6: susceptibilidade magnética dos minerais diamagnéticos. Extraído de Schön (2004).....	40
Tabela 7: Susceptibilidade magnético dos minerais paramagnéticos. Extraído de Schön (2004).....	41
Tabela 8: Susceptibilidade magnética de alguns grupos de rochas. Extraído de Robinson (1988).....	42
Tabela 9: Equipamentos utilizados. Extraído de relatório técnico LASA. (2010).....	43
Tabela 10: Intervalo de detecção dos radioelementos e seus picos de energia. Modificado de Ribeiro <i>et al</i> (2013).....	44
Tabela 11: Coeficientes de contribuição do Radônio. Extraído de Lasa (2010).....	48
Tabela 12: Coeficientes de Atenuação Atmosférica. Extraídos de LASA (2010). ....	50
Tabela 13: Coeficiente de sensibilidade. Extraído de LASA (2010). ....	51
Tabela 14: Resumo dos valores radiométricos para a área do estudo. ....	80

## Lista de Siglas

Ag – Prata

As - Arsênio

ASA – Amplitude do sinal analítico

Au - Ouro

Bi – Bismuto

CGGPM – Complexo Granítico Gnaissico Pinheiro Machado

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

CT – Contagem total dos elementos K, eTh e eU

Cu - Cobre

Dz – Primeira derivada

Dzz – Segunda derivada

E - Resistividade elétrica

EM – Eletromagnético

ESRG – Escudo Sul-riograndense

eTH – equivalente Tório

eU – equivalente Urânio

G – Gravimétrico

GHT – Gradiente horizontal total

GHT\_ISA – Gradiente horizontal total com inclinação do sinal analítico

Hg – Mercúrio

HS – High sulfidation

IGRF - International Geomagnetic Reference Field

ISA – Inclinação do sinal analítico

ISA\_GHT – Inclinação do sinal analítico com gradiente horizontal total

K – Potássio

LS – Low sulfidation

M – Magnético

Mo – Molibdênio

OMG – Oasis Montaj Geosoft

Pb – Chumbo

PE - Potencial espontâneo



PI - Polarização induzida

R – Radiométrico

Rd - Radar de penetração no solo.RGB – Red, green, blue

RTP – Redução ao polo

S – Sísmico

Sb – Antimônio

Se - Selênio

Sn - Estanho

Te – Telúrio

UC – Continuação para cima

Zn – Zinco

## Sumário

1 Introdução .....	16
1.1 Caracterização do problema .....	16
1.2 Premissas.....	17
1.3 Hipótese .....	17
1.4. Justificativa.....	19
1.5 Objetivos e metas.....	19
1.6 Estratégia de ação .....	19
2 Contexto Geológico .....	22
2.1 Geologia Regional.....	22
2.2 Geologia Local .....	25
3 Materiais e métodos .....	27
3.1 Depósitos Epitermais .....	27
3.2 Geofísica aplicada a identificação de depósitos minerais – Um breve histórico..	29
3.2.1 Princípios do Levantamento Gamaespectrométrico.....	31
3.2.2 Comportamento dos radioelementos nas rochas .....	33
3.2.2.1 Potássio.....	33
3.2.2.2 Urânio e Tório.....	34
3.2.3 Resposta radiométrica dos depósitos minerais .....	36
3.2.4 Princípios da Magnetometria.....	37
3.2.4.1 O campo magnético terrestre e suas componentes .....	38
3.2.4.2 Magnetismo de rochas e minerais.....	39
3.3 Aquisição de dados Aéreos.....	42
3.3.1 Aerogamaespectrometria .....	44
3.3.1.1 Correção do tempo morto.....	45
3.3.1.2 Aplicação de filtragem .....	45
3.3.1.3 Correção do erro de paralaxe.....	45
3.3.1.4 Cálculo da altura efetiva de voo .....	46
3.3.1.5 Remoção da Radiação de Fundo da Aeronave e Cósmico.....	46
3.3.1.6 Remoção da radiação de fundo do Radônio atmosférico.....	47
3.3.1.7 Correção do efeito Compton .....	49
3.3.1.8 Correção Altimétrica (Coeficiente de Atenuação Atmosférica).....	50
3.3.1.9 Conversão para Concentração de Elementos.....	50

3.3.2 Aeromagnetometria .....	52
3.3.2.1 Correção do Erro de Paralaxe .....	52
3.3.2.2 Remoção da Variação Magnética Diurna .....	53
3.3.2.3 Nivelamento dos Perfis.....	53
3.3.2.4 Micronivelamento dos Perfis .....	54
3.3.2.5 Remoção do IGRF.....	54
3.4 Aquisição de dados terrestres .....	54
3.4.1 Gamaespectrometria .....	57
3.4.1.1 Fator F.....	58
3.4.1.2 Mapa ternário .....	59
3.4.2 Magnetometria .....	59
3.4.2.1 Correção da variação diurna .....	60
3.4.2.2 Processamento dos dados magnéticos – Filtros .....	61
3.4.2.3 Filtro Redução ao Pólo Magnético – RTP .....	62
3.4.2.4 Filtro Continuação para Cima – UC.....	63
3.4.2.5 Filtro Primeira e segunda derivadas – Dz e Dzz .....	64
3.4.2.6 Filtro Amplitude do Sinal Analítico – ASA.....	64
3.4.2.7 Filtro Gradiente Horizontal Total – GHT .....	65
3.4.2.8 Filtro Inclinação do Sinal Analítico – ISA.....	65
3.4.2.9 Filtro Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico - GHT_ISA .....	66
3.4.2.10 Filtro Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total - ISA_GHT .....	66
3.4.3 Modelamento Geofísico.....	67
4 Resultados .....	69
4.1 Gamaespectrometria .....	69
4.2 Magnetometria .....	80
4.3 Modelo Geofísico em três dimensões .....	95
5 Integração dos dados .....	101
6 Conclusões.....	113
7 Referências .....	115

## 1 Introdução

### 1.1 Caracterização do problema

Os depósitos epitermais podem ser fonte de metais como Au, Ag e Cu, além de uma série de outros elementos. Na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul está localizado o município de Amaral Ferrador (Figura 1), onde no início dos anos 2000, a chamada Mina Galena foi explorada pela Mineração Galena SA, da qual se extraiu chumbo.

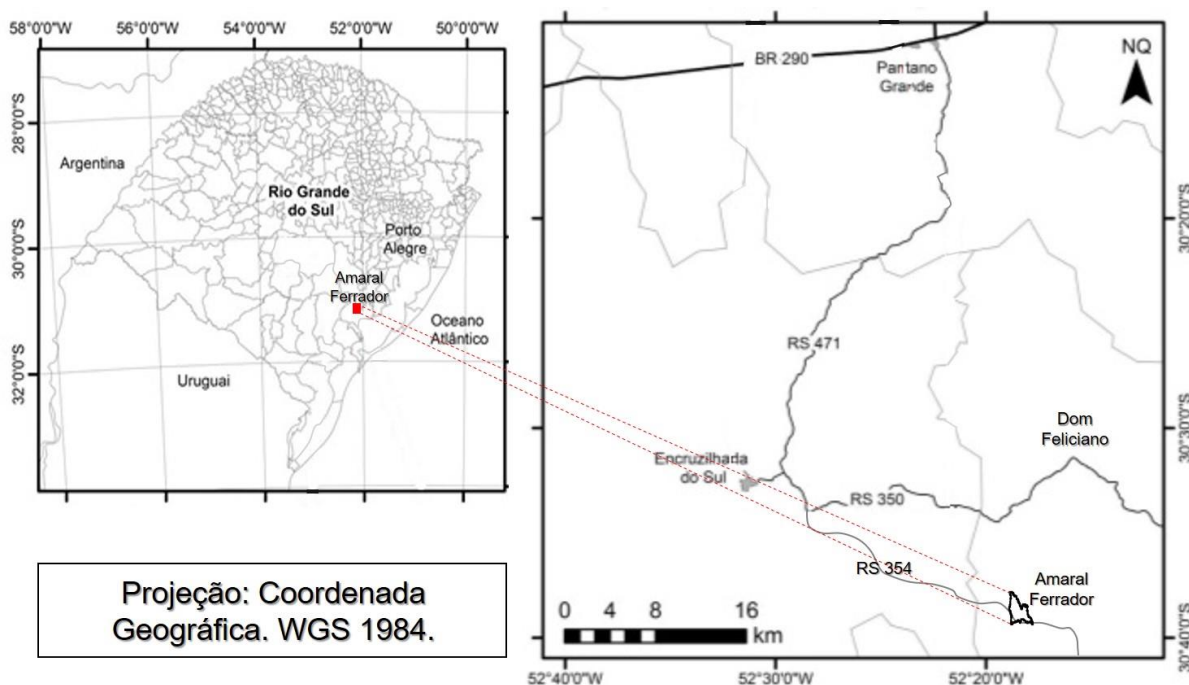


Figura 1: Localização da área de estudo. Modificado de Hasenack e Weber (2010).

Estudos anteriores de Rost (2006) e Heinrichs (2010) caracterizaram essa Mina como de origem epitermal de baixa sulfetação e de baixa profundidade. Já Garcia (2013), construiu um Sistema Geográfico de Informação voltado à prospecção mineral na região da Mina Galena, com base em dados de sedimentos de corrente obtidos pela CPRM, cujo tratamento estatístico gerou anomalias de determinados elementos, com destaque para Se, Te, Pb e Sn.

Normalmente os depósitos de natureza epitermal não ocorrem isolados, de modo que se acredita que, aliando os dados conhecidos até o momento com os dados de geofísica, possam ser detectados outros alvos mineralizados presentes na área principalmente em estruturas tectônicas.

## **1.2 Premissas**

Os métodos geofísicos constituem uma ferramenta de alta aplicabilidade na pesquisa mineral, principalmente em casos com minérios de sulfetos (maciços e/ou disseminados), pois a partir do contraste de propriedades físicas entre um alvo potencialmente mineralizado e a rocha encaixante é possível a detecção de acumulações minerais economicamente significativas, detectadas por anomalias magnéticas e gamaespectrométricas (Kearey, 2009).

## **1.3 Hipótese**

O presente estudo trabalha com a hipótese de que com a utilização dos métodos geofísicos é possível identificar e correlacionar anomalias geofísicas relacionadas à depósitos minerais, e ainda, se possível, reconhecer os controles destes depósitos. O trabalho utilizará os dados do levantamento aéreo realizado pela LASA Prospecções no Escudo Sul Riograndense (Figura 2), (CPRM 2010), no qual foram contemplados os métodos magnéticos e gamaespectrométricos. Será realizado um trabalho de campo utilizando o gamaespectrômetro e magnetômetro terrestre, para adensar a malha de estudo, além da elaboração de perfis de subsuperfície em áreas estratégicas ainda a serem definidas com base em estruturas e possíveis anomalias.

Os levantamentos aerogeofísicos se fundamentam na assertiva de que as propriedades físicas das rochas que compõem a crosta terrestre diferem rapidamente à medida que, espacialmente, são alteradas as características geológicas pela variação da litologia, estrutura e geometria dos corpos subjacentes. A propriedade física em que se apoia o método gamaespectrométrico é a radioatividade natural das rochas e dos solos resultantes da ação do intemperismo sobre o estrato rochoso (Hildenbrand, 2014). A magnetometria é reconhecida e consolidada na prospecção

mineral, apresentando bons resultados referentes ao mapeamento geológico e delineamento estrutural, e também em associações entre domínios magnéticos e possíveis mineralizações (Telford *et al.*, 1976), e baseia-se na certeza de que concentrações de minerais magnéticos nas rochas da crosta produzem distorções locais (anomalias) nos elementos do campo magnético terrestre. Essas anomalias podem fornecer informações sobre o modo e distribuição dos minerais magnéticos em subsuperfície (e.g. Kearey, 2009).

A fundamentação teórica dos métodos a serem utilizados serão discutidas no Capítulo de materiais e métodos.



Figura 2: Área do Projeto Aerogeofísico no Escudo Sul-Riograndense. Extraído de CPRM. Relatório técnico, volume 1 (2010).

#### **1.4. Justificativa**

Os métodos indiretos de pesquisa são cada vez mais utilizados em prospecção mineral. Determinadas técnicas, por serem economicamente viáveis em um projeto inicial de um Planejamento Mineiro, ao mostrarem uma resposta aceitável podem economizar milhões de reais no projeto, viabilizando assim o mesmo. Logo, é necessário conhecer as técnicas que apresentam as melhores respostas em cada método, como por exemplo, a gamaespectrometria, na delimitação de alterações hidrotermais, e, a distribuição em profundidade de corpos com magnetização anômala que representam possíveis alvos de exploração mineral. Além disso, serão obtidos dados de maior detalhamento geofísico, inéditos até o momento na região.

#### **1.5 Objetivos e metas**

O objetivo deste trabalho é fazer uma caracterização geofísica na Mina Galena e arredores, na região de Amaral Ferrador com aquisição de dados de aerogeofísica e geofísica terrestre com a utilização de gamaespectrômetro e magnetômetro, e posterior processamento. De modo que se pretende:

- A – Estabelecer uma correlação entre os métodos geofísicos com os possíveis controles da mineralização como falhas, descritos em trabalhos anteriores.
- B – Delimitar, se possível, prováveis corpos ou regiões anômalas, que possam ser futuramente, alvos de interesse prospectivo.
- C – Propor um modelo geofísico da região.

#### **1.6 Estratégia de ação**

O projeto foi desenvolvido em três etapas: pré-campo, campo e pós-campo, descritos a seguir. A Tabela 1 resume o planejamento de todo o trabalho.

A etapa de pré-campo consistiu inicialmente na aquisição das imagens referentes ao levantamento aéreo em projeto coordenado pela CPRM e executado pela LASA PROSPECÇÕES S.A., na qual se obteve dados de gamaespectrometria e magnetometria na região centro sul do estado do Rio Grande do Sul, na área que abrange o chamado Escudo Sul Riograndense (ESRG), dados estes disponíveis na

plataforma GEOBANK, no sítio da CPRM. Estes dados receberam tratamento computacional em *software Oasis Montaj Geosoft (OMG)*, no polígono de estudo, tentando obter anomalias potenciais, comparando-se os dados de magnetometria com os de gamaespectrometria. A partir disso, as anomalias levantadas foram investigadas posteriormente na etapa de campo. Segundo Vasconcelos *et al.* (1994), o processamento do *software* utiliza uma série de algoritmos que efetuam a aplicação de filtros específicos em dados sob a forma de malha regular com o propósito de realçar, atenuar, eliminar ou transformar determinadas feições lineares e/ou planares, em função dos dados e dos objetivos de integração com a geologia.

A etapa de campo foi realizada na forma de malha irregular em uma escala de trabalho 1:2000. O levantamento ocorreu nas proximidades da Mina Galena, no município de Amaral Ferrador. Experiências anteriores na pesquisa mineral, e mais recentemente nas Minas do Camaquã em empreendimento da empresa *Nexa Resources*, mostram que muitas ocorrências minerais estão próximas a regiões já exploradas pelas empresas. Portanto o ponto de partida deste levantamento terrestre foi a própria Mina Galena e a partir desta, foi gerada a malha de trabalho.

A etapa pós-campo foi reservada para a compilação de todos os dados, aéreos e terrestres, tratamento das imagens dos dados terrestres, no qual os dados foram interpolados, gerando um produto final, permitindo realizar a integração de todos os dados e as conclusões.





## 2 Contexto Geológico

Neste capítulo são abordadas as características geológicas da região do estado. Para tanto, dividiu-se o texto em Geologia regional, na qual são tratados corpos e estruturas, cujos dados foram obtidos por meio do mapeamento geológico do Serviço Geológico Brasileiro, e em geologia local, onde a abordagem se dá nas proximidades da mina, na qual os dados foram extraídos de trabalhos anteriores na região.

### 2.1 Geologia Regional

Estudos realizados até o momento dividem o Escudo Sul-riograndense (ESRG) em duas formas. A primeira divide o ESRG em duas partes: uma pequena área cratônica no extremo oeste conhecida como Cráton Rio de La Plata (Almeida et al. 1973), e a outra que se refere a faixa Neoproterozoica denominada de Cinturão Dom Feliciano (Fragoso-Cesar 1980). A segunda forma foi proposta a partir dos trabalhos de Fernandes *et al.* (1995), o qual, a partir de estudos geofísicos utilizando como parâmetro descontinuidades gravimétricas e aeromagnéticas, dividiu o ESRG em três domínios geofísicos: oriental, central e ocidental (Figura 3).

O Domínio Geofísico Ocidental é composto pelo Cráton Rio de La Plata com a predominância de rochas granulíticas, segundo Fernandes *et al.* (1995), delimitado do Bloco central-Oeste pela Sutura de São Gabriel, delimitando o Cráton Rio de La Plata, à oeste, do Cinturão Dom Feliciano, ao qual pertencem os blocos oriental e central.

Na porção Oriental ocorrem rochas plutônicas, onde predominam granitoides cálcio-alcalinos, sendo separada da porção central pela Zona de Sutura de Porto Alegre.

Por sua vez o Domínio Central é subdividido através da Sutura de Caçapava do Sul em duas partes, denominadas centro-leste e centro-oeste. A porção centro-leste é constituída por sequências supra crustais, granitoides e septos paleoproterozoicos do embasamento, organizados em uma direção NE ao final da orogênese pela Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu. A porção centro-oeste também possui ampla gama de unidades geológicas, no entanto sua principal característica,

de acordo com Fernandes *et al.* (1995), é a presença de um segmento juvenil Neoproterozoico.

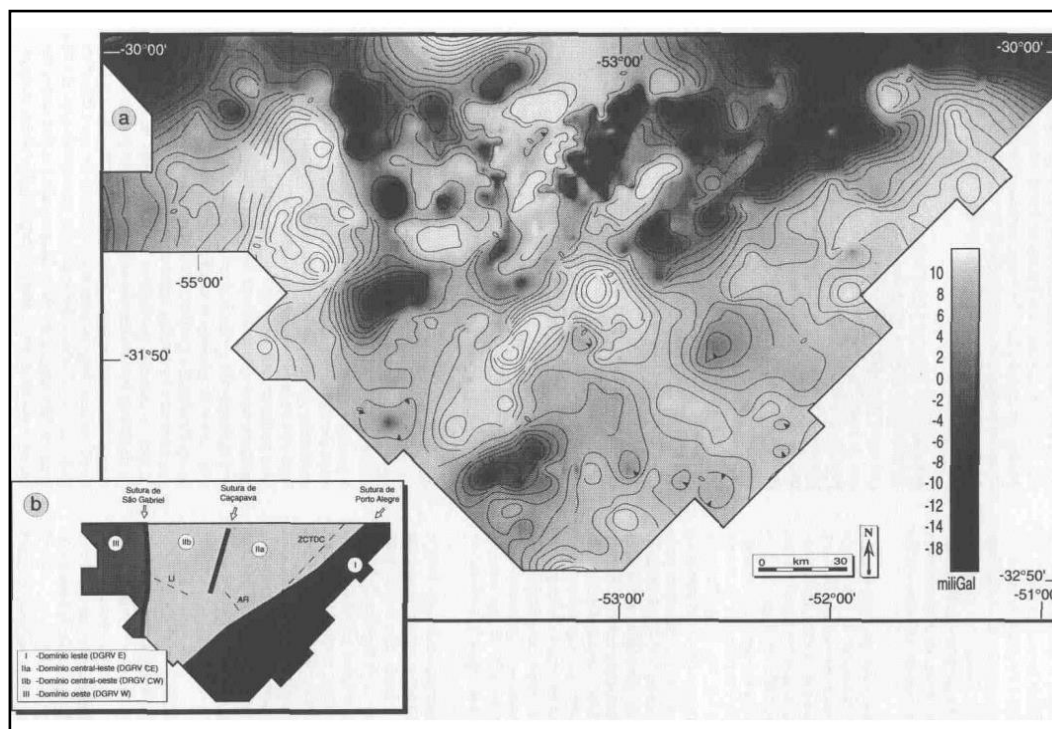


Figura 3: Mapa de anomalia Bouguer para o ESRG, o qual se dividiu em quatro domínios principais: I - Domínio gravimétrico oriental; IIa - Domínio gravimétrico centro-leste; IIb - Domínio gravimétrico centro-oeste; III - Domínio gravimétrico ocidental (Extraído de Fernandes *et al.* 1995).

O presente estudo se encontra no Domínio Oriental e central, em região classificada como Cinturão Dom Feliciano Leste (Frantz & Botelho, 2000). Esta porção leste do Cinturão Dom Feliciano é composta por um terreno granítico-migmatítico entendido como um arco magmático continental exposto e erodido de forma diferencial (Frantz *et al.* 2000). O Cinturão Dom Feliciano possui evolução marcada por três estágios de intrusões graníticas, em três regimes tectônicos: regime de tectônica tangencial, regime transcorrente e um regime pós transcorrente extensional.

Os trabalhos de mapeamento geológico da CPRM em escala 1:750000 dividiram a região onde está inserido o polígono de estudo, em seis unidades geológicas, que Wildener *et al.* 2006 (Figura 4), caracterizou da seguinte maneira:

- 1 – Complexo Granítico-Gnaissico Pinheiro Machado: unidade mais antiga, na qual ocorrem metagranitóides porfíricos, mesocráticos, de coloração cinza, com enclaves de gnaisses tonalíticos e dioríticos.
- 2 - Suíte Granítica Dom Feliciano – Fácies Cerro Grande: monzogranitos porfíricos de textura grossa com enclaves mesocráticos.
- 3 - Suíte Granítica Dom Feliciano – Fácies Serra do Herval: sienogranito rosado equigranular rico em feldspato, quartzo e com baixa quantidade de feldspato branco e micas.
- 4 - Formação Sanga do Cabral: conglomerados intraformacionais e arenitos conglomeráticos mal selecionados, que por vezes possuem estratificação cruzada acanalada e também estratificação planar de pequeno a médio porte.
- 5 - Depósitos eluviais e coluviais: areias quartzosas de cor amarelo acastanhadas de granulometria fina a muito grossa, com grãos subarredondados a arredondados, mal selecionadas e laminação plano paralela incipiente.
- 6 - Depósitos quaternários: sedimentos de origem aluvionar com granulometria cascalhosa, arenosa e argilosa e que variam de semiconsolidadas a inconsolidadas.

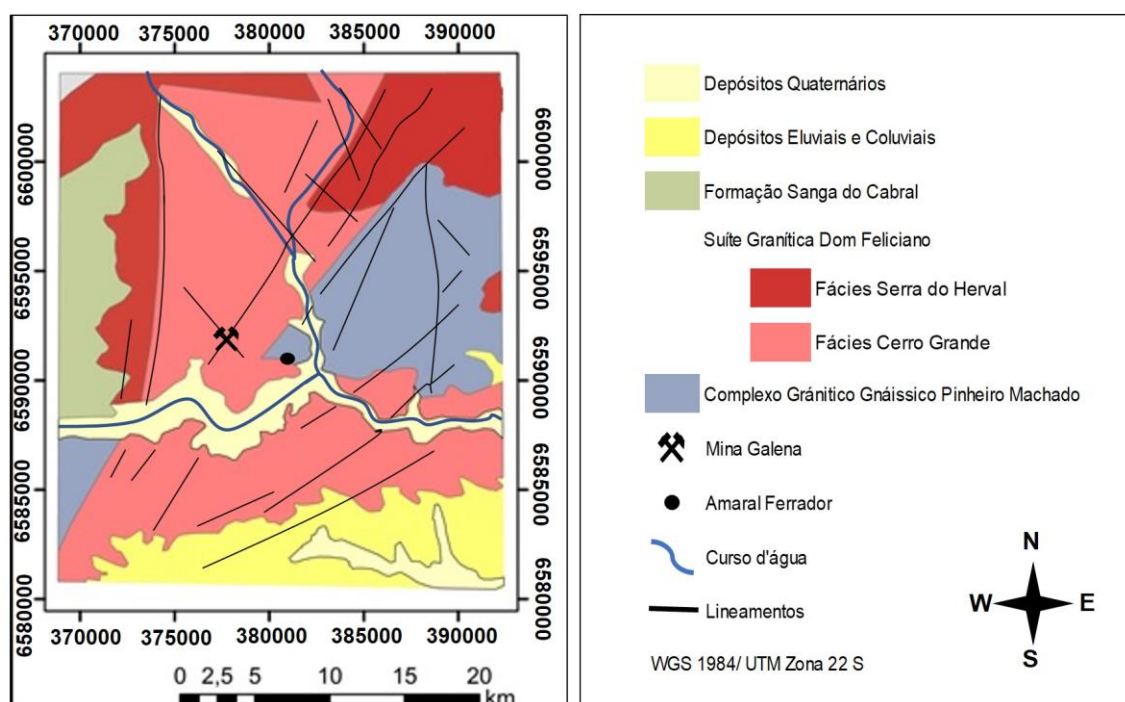


Figura 4: Mapa Geológico da região de estudo (modificado de Wildner et al., 2006).

## 2.2 Geologia Local

A partir de trabalhos anteriores na região de Amaral Ferrador como o de Rost (2006) e Heinrichs (2010), pode-se descrever a geologia local englobando aspectos como a litologia, as relações de alteração com o minério e o controle estrutural. Rost (2006), elaborou um mapa Geológico em escala 1.25000 (Figura 5). Predominam na área de estudo rochas Monzograníticas heterogêneas e Granodioríticas, representantes da fácies Cerro Grande, as quais são hospedeiras das alterações hidrotermais e a litologia pertencente a área mineralizada da Mina Galena.

Os monzogranitos heterogêneos são descritos como biotita monzogranitos e por vezes possuem variação para sienogranitos. Esta unidade apresenta variação de termos inequigranulares porfiríticos a seriados, com megacristais de K-feldspato e fenocristais de plagioclásio. Também se observa foliação de fluxo ígneo com orientação média N40E, marcada pela orientação das biotitas e megacristais de K-feldspatos.

Já os granodioritos afloram em lajeados em beira de drenagens de forma localizada representados por três corpos elípticos orientados para NE e concordantes com a estruturação tectônica da área. Estas rochas são descritas como biotita granodioritos melanocráticos com textura fina a média. Com base em algumas características como a presença de megacristais de K-feldspato e a relação de mútua intrusão nos granodioritos, a contemporaneidade destas rochas com os monzogranitos se torna evidente.

Além das litologias mencionadas acima, outras duas, que são representadas por intrusões locais de pequeno a médio porte ocorrem próximas a área da Mina Galena: quartzo monzonito e quartzo pórfiro. O quartzo monzonito é composto por rochas melanocráticas a leucocráticas, cinza a branco com biotita, com textura predominantemente equigranular fina a média com fenocristais localizados de K-feldspatos e plagioclásio. O quartzo pórfiro é representado por intrusões locais, variando de alguns centímetros a centenas de metros, de granitoides leucocráticos rosados. Sua textura é fina com tendência a ser inequigranular, e ainda, possui cristais de quartzo pórfiros que variam de arredondados a prismáticos, e também contém fenocristais de K-feldspato.

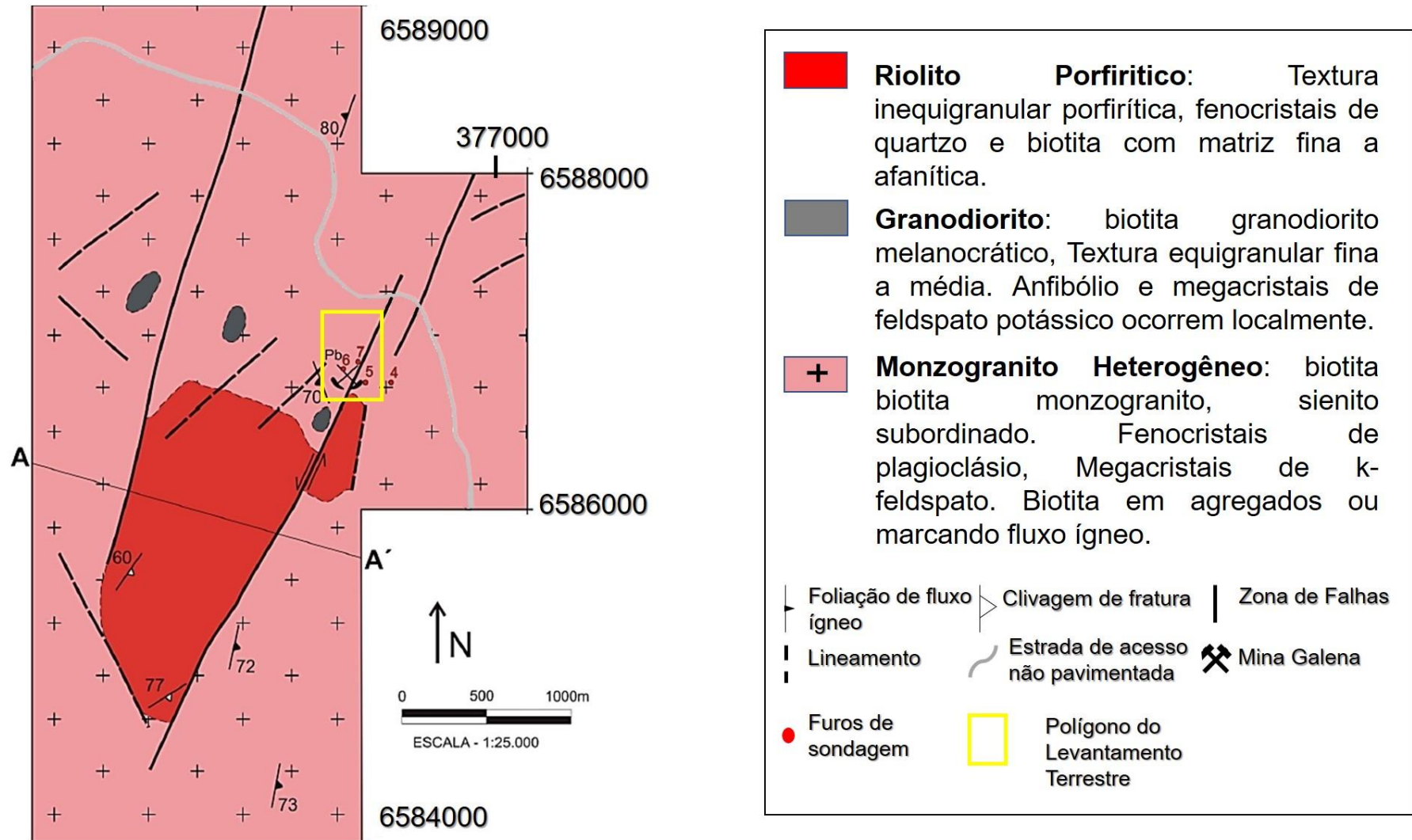


Figura 5: Mapa Geológico da região de Amaral Ferrador. Modificado de Rost (2006).

### **3 Materiais e métodos**

Neste capítulo será abordada a fundamentação teórica referente aos métodos geofísicos que serão utilizados, bem como a geologia da região do estudo. Também será realizada uma pequena revisão sobre o conceito de depósitos epitermais, por ser característico na mina de chumbo dentro da área do estudo.

#### **3.1 Depósitos Epitermais**

Os depósitos minerais do tipo epitermal têm sido amplamente estudados por contribuírem na produção mundial de ouro, prata, cobre, chumbo, zinco, entre outros metais. Os principais depósitos epitermais estão localizados no chamado cinturão de fogo do pacífico, distribuídos no Japão, Chile, Indonésia e oeste dos Estados Unidos. São sistemas hidrotermais com manifestações em superfície hospedados em rochas vulcânicas, formados em baixas profundidades, geralmente entre 100 – 200 metros, podendo chegar a 1500 metros de profundidade. A mineralização principal está relacionada a veios epitermais ricos em Au, Ag, Pb, Zn, bem como As e Cu. Os fluídos hidrotermais são variados, predominantemente magmáticos em depósitos epitermais de alta sulfetação (HS) e predominantemente meteóricos em depósitos de baixa sulfetação (LS) de acordo com Hedenquist *et al* 2000 (Figura 6).

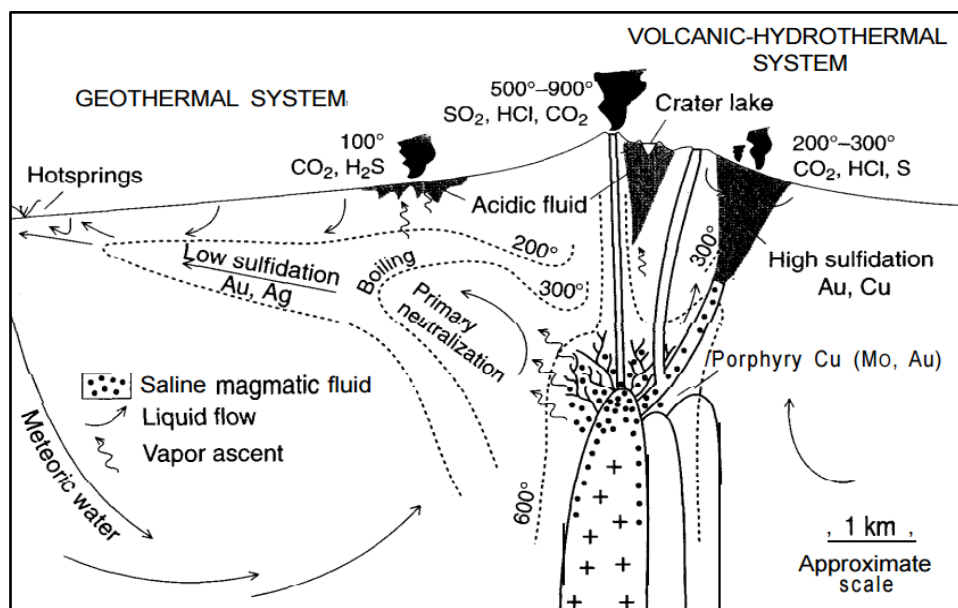


Figura 6: Ilustração mostrando posicionamento, processos e mineralização em depósitos epitermais de alta e baixa sulfetação. Extraído de Hedenquist (2000).

Segundo White & Hedenquist (1995), a divisão entre alta e baixa sulfetação é feita classificando os depósitos epitermais principalmente com relação a distância da fonte magmática, no qual cada tipo genético, HS e LS, apresenta características distintas, podendo ser separados de acordo com a tabela 2:



Tabela 2: Características dos depósitos epitermais do tipo alta e baixa sulfetação. Compilado de White & Hedenquist (1995), e Hedenquist (2000).

<b>Características</b>	<b>ALTA SULFETAÇÃO - HS</b>	<b>BAIXA SULFETAÇÃO - LS</b>
<b>Alteração</b>	Ampla	Restrita
<b>Minerais de alteração</b>	Alunita	Sericita – adularia
<b>Características do quartzo</b>	Maciço, grão fino, residual	Calcedônia, cruziforme, coliforme
<b>Carbonatos</b>	Ausente	Frequentemente de Mn
<b>Sulfetação</b>	Até 90%	Até 20%
<b>Minerais de minério</b>	Enargita, calcocita, covelita, bornita, pirita	Esfalerita, galena, pirita, calcopirita
<b>Mineralização principal</b>	Cu, Au, As, Ag, Pb	Au e/ ou Ag, Pb, Zn, Cu
<b>Mineralização secundária</b>	Bi, Sb, Mo, Sn, Zn, Te, Hg	Mo, Sb, As, Te, Se, Hg

### 3.2 Geofísica aplicada a identificação de depósitos minerais – Um breve histórico

A Geofísica aplica os princípios da física ao estudo da terra. A investigação geofísica do interior do planeta consiste em realizar medidas em sua superfície ou próximo a ela. Estas medidas são diretamente influenciadas pela distribuição interna das propriedades físicas da terra e a análise destas medidas podem revelar como as propriedades físicas do interior da terra variam vertical e lateralmente Kearey et al. (2009).

O trabalho de pesquisa em geofísica pode ser realizado em diferentes escalas que incluem uma ampla gama de aplicações, do estudo de toda a terra à exploração de uma região para fins de engenharia ou outros propósitos. Os levantamentos geofísicos voltados a exploração mineral, normalmente utilizam grandes áreas inicialmente, e com a continuação do trabalho, os levantamentos

vão se concentrando em áreas cada vez menores que reflitam alguma anomalia de interesse econômico. As medidas são usadas para determinar as distribuições das propriedades físicas a profundidades que reflitam localmente a geologia de subsuperfície.

Existem outros métodos para investigar uma determinada região, como por exemplo a perfuração de poços, porém além de ser um método de custo elevado, fornece apenas informações localizadas. Embora os levantamentos geofísicos possam ser passíveis de incertezas na interpretação dos dados, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações de subsuperfície. Os métodos geofísicos são capazes de detectar e delinear características locais de interesse potencial, que não poderiam ser descobertas por um programa de perfuração. Isto não significa que o levantamento geofísico não necessite da perfuração de poços, mas, se aplicado corretamente, pode-se maximizar a taxa de cobertura da área e desta forma minimizar as perfurações requeridas. Segundo Kearey et al. (2009), a importância da geofísica de exploração como meio de obtenção de informações geológicas de subsuperfície é tão grande que os princípios básicos e o alcance dos métodos, bem como seus principais campos de aplicação, deveriam ser reconhecidos por todos os cientistas que possuem como objeto de estudo o planeta Terra. A Tabela 3 mostra alguns exemplos de métodos geofísicos e suas aplicações.

Tabela 3: Aplicações de levantamentos geofísicos. G, gravimétrico; M, magnético; S, sísmico; E, resistividade elétrica; PE, potencial espontâneo; PI, polarização induzida; EM eletromagnético; R, radiométrico; Rd, radar de penetração no solo. Extraído de Kearey et al. (2009).

<b>Aplicação</b>	<b>Métodos geofísicos</b>
Exploração de combustíveis fósseis	S, G, M, EM
Exploração de depósitos minerais metalíferos	M, EM, E, PE, PI, R
Exploração de depósitos minerais inconsolidados	S, E, G
Exploração de água subterrânea	E, S, G, Rd
Investigação de áreas para construção	E, S, Rd, G, M
Investigações arqueológicas	Rd, E, EM, M, S

### **3.2.1 Princípios do Levantamento Gamaespectrométrico**

Segundo Hildenbrand (2014), os levantamentos gamaespectrométricos ou radiométricos, se fundamentam no princípio de que as propriedades físicas das rochas que compõem a crosta terrestre diferem rapidamente à medida que, espacialmente, são alteradas as características geológicas pela variação da litologia, estrutura e geometria dos corpos subjacentes. A propriedade física em que se apoia o método é a radioatividade natural das rochas e dos solos resultantes da ação do intemperismo sobre o estrato rochoso.

Os levantamentos aéreos, que são parte deste trabalho, são realizados no Brasil desde a década de 50, mas foi apenas a partir de 70 que os projetos ganharam relevância, principalmente com o objetivo de fomentar a exploração mineral e posteriormente, para apoiar projetos de mapeamento geológico pela CPRM. Os dados de gamaespectrometria podem ser adquiridos em conjunto com as medições do campo magnético terrestres, nos chamados levantamentos combinados.

O método é empregado na pesquisa dos depósitos necessários a essa aplicação e também dos depósitos não radioativos associados aos elementos radioativos, como o titânio e o zircônio Kearey et al. (2009). O método gamaespectrométrico é útil no mapeamento geológico, pois diferentes tipos de rochas possuem assinatura radioativa distinta (Moxham, 1963; Pires & Harthill, 1989). Sua fundamentação se baseia na detecção das radiações gama, emitidas como resultado da desintegração radioativa de elementos contidos a até 45 cm da camada de solo, ou diretamente das rochas aflorantes. Existem mais de 50 isótopos radioativos de ocorrência natural, mas a maioria é rara ou fracamente radioativa. Os elementos de maior interesse, no entanto são três: Potássio ( $K^{40}$ ) e os produtos de desintegração da série do Urânio ( $U^{238}$ ) e Tório ( $Th^{232}$ ). Segundo Kearey et al. (2009), há um considerável número de minerais radioativos. Entretanto, os mais comuns e seus respectivos modos de ocorrência estão listados na Tabela 4.

Tabela 4: Minerais radioativos e suas respectivas ocorrências (modificado de Kearey 2009).

<b>Elemento</b>	<b>Mineral</b>	<b>Ocorrência</b>
<b>Potássio</b>	Feldspatos, ortoclásio e microclínio	Principais constituintes de rochas ígneas ácidas e pegmatitos
	Muscovita	
	Alunita	Alteração em rochas vulcânicas
	Silvita, Carnalita	Depósitos salinos em sedimentos
<b>Tório</b>	Monazita	Granitos, pegmatitos, gnaisses
	Torianita	Granitos, pegmatitos, pláceres
	Torita, uranotorita	
<b>Urânio</b>	Uraninita	Granitos, pegmatitos e veios de Ag, Pb, Cu, etc.
	Carnotita	Arenitos
	Gumita	Associado a uraninita

### 3.2.2 Comportamento dos radioelementos nas rochas

Com a finalidade de compreender o comportamento dos elementos analisados no levantamento gamaespectrométrico, será brevemente abordado o comportamento geoquímico dos radioelementos K, U e Th na natureza, estabelecendo assim os fundamentos para uma apreciação dos resultados obtidos. A Tabela 5 mostra a concentração média em rochas ígneas destes elementos.

Tabela 5: Concentração média de radioelementos em rochas ígneas. Modificado de Silva (2010).

<b>Tipologia</b>	<b>U (ppm)</b>	<b>Th (ppm)</b>	<b>K %</b>
Granitoides	0,4 - 7,8	2,3 – 45	0,3 – 4,5
Granitos, riolitos, etc	4,5	15	-
Ácida intrusiva	0,1 - 30	0,1 – 253,1	0,1 – 7,6
Pegmatitos	0,3 - 1	0,3 – 9,6	2,6 – 5,5
aplitos	1,8	3 – 20	0,6 – 4
Ácida extrusiva	0,8 - 16,4	1,1 – 41	1 – 6,2
Quartzo feldspática porfirítica	1,3 - 2,9	6 – 14	1 – 5
Média	5,7	31,6	3,2
Desvio padrão	8,7	68,2	2,6
Coeficiente de variação	1,5	2,2	0,8

#### 3.2.2.1 Potássio

O potássio é um elemento abundante na crosta da Terra (>2%), majoritariamente presente nos feldspatos potássicos e nas micas, e também em alguns argilominerais formados durante a diagênese ou por alteração hidrotermal em especial, a illita, com teores de K<sub>2</sub>O em torno de 7,5%. Subordinadamente é integrante menor em plagioclásios, principalmente nos

mais sódicos, com teores que raramente ultrapassam 0,5% K<sub>2</sub>O (por vezes, até 1%). Como estes minerais estão presentes em grande proporção na composição mineralógica das rochas félsicas, como os granitos, riolitos, dacitos, dentre outros, a resposta radiométrica do K é marcante para tais litologias, além de algumas rochas sedimentares como arcóseos, lamitos, folhelhos e argilitos com argilas I/S, illita e em evaporito com sais de potássio como a carnalita e a silvinita. O elemento não aparece em outros minerais abundantes na crosta continental, como quartzo, olivinas, cloritas e carbonatos, ocorrendo apenas em teores muito baixos nos piroxênios ou anfibólios mais comuns (Dickson & Scott, 1997 e Deer et al. 1992). Os teores de K são baixos a moderados na maioria dos demais sedimentos e rochas sedimentares e metamórficas equivalentes, em rochas ígneas intermediárias a básicas (e equivalentes metamórficos tais como anfibolitos), e muito baixos em rochas ultramáficas e seus equivalentes metamórficos (peridotitos, dunitos, piroxenitos, serpentinitos, talco xistos).

De acordo com Ulbrich et al.(2009), aparece com abundância média de 1,50% (1,81% K<sub>2</sub>O) na crosta continental total, concentrado na crosta continental superior (2,32% K, 2,80% K<sub>2</sub>O), mais exaurido na sua parte inferior (0,51% K, 0,61% K<sub>2</sub>O). Conforme Rollinson (1994), é um elemento com raio iônico grande (1,33 Å), formando juntamente com outros cátions mono e bivalentes (tais como Cs, Rb, Sr, Eu bivalente, Pb e Ba) o grupo dos cátions LFS (*low field strength*) e LIL (*large ion lithophile*), largamente concentrados na crosta continental, em especial na sua parte superior. Além disto, o K é extremamente móvel em ambientes de alteração hidrotermal e durante o intemperismo, em especial o de climas tropicais a subtropicais, com fortes regimes de chuvas (Wilford et al., 1997).

### 3.2.2.2 Urânio e Tório

O urânio apresenta abundância média de 1,3 ppm, com concentração maior na crosta continental superior (2,7 ppm) e menor na sua parte inferior (0,2 ppm). Já o tório é encontrado com teor estimado médio de 5,6 ppm na crosta continental, enriquecido até 10,5 ppm na parte superior, e bastante exaurido na inferior (1,2 ppm).

De acordo com Bea (1996), afirma que esses dois elementos estão comumente presentes em minerais acessórios encontrados em rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas. O número destas fases portadoras de U e Th é incrementado nos granitoides evoluídos (peralcalinos, “alaskíticos” entre outros, acompanhados, ou não, de manifestações pegmatíticas e aplíticas) (Ulbrich *et al.*, 2009), e apresentam comportamentos similares em rochas ígneas e metamórficas, porém, em ambiente sedimentar e no manto de intemperismo, a mobilidade do tório é menor que a do urânio.

Em estruturas minerais  $U^{4+}$  e  $Th^{4+}$  constituem cátions de tamanhos médios e bastante eletronegativos, formando com outros elementos de raios iônicos equivalentes ou superiores (0,68 Å do Ti até 1,22 Å do La) o grupo dos cátions HFS (*high field strength*), incluindo todos os ETR trivalentes, além de  $Ce^{4+}$ , Y,  $Pb^{4+}$ , Zr, Hf, Cs, Ti, Nb e Ta. Estes elementos podem, com alguma facilidade, substituir-se mutuamente em estruturas cristalinas. Assim,  $U^{4+}$  e  $Th^{4+}$  podem aparecer em minerais portadores de ETR (em especial os com Ce), Y, Zr, Hf e outros.

A baixa solubilidade do  $ThO_2$  e de outros compostos de tório faz com que estes sejam pouco afetados pelo intemperismo, o que leva a um aumento no conteúdo de tório no perfil de alteração devido à acumulação residual (Queiroz, 1975). O mesmo autor cita que o tório ocorre como material detrítico, incorporado nos minerais resistatos, bem como fixado nos argilominerais originadas pelo intemperismo, de forma que as maiores concentrações são verificadas nas argilas residuais ocorrentes no topo do perfil de alteração.

O comportamento do urânio, conforme comentado anteriormente, é similar ao do tório em rochas ígneas e metamórficas. Contudo, em ambiente sedimentar e no manto de intemperismo, sob condições oxidantes, especialmente com águas ácidas ou ricas em carbonato, o urânio tem grande mobilidade, podendo ser transportado a grandes distâncias. Sob condições redutoras, em águas ricas em matéria orgânica e em óxido de ferro, o urânio é fortemente adsorvido a esses materiais tornando-se fixo. Portanto, os principais fatores que interferem na mobilidade e na dispersão do urânio são o potencial de oxirredução (redox), o pH e a presença de materiais adsorventes (argilominerais) e de agentes complexantes (orgânicos) na água.

Ainda, segundo Godoy (2010), o teor de tório na crosta terrestre oscila entre 8 e 12 ppm e do urânio entre 2 e 3 ppm, e a razão Th/U nas rochas encontra-se entre 2,7 e 6. Pelo fato da mobilidade do tório ser em geral muito baixa em relação à do urânio, o aumento da relação Th/U poderia indicar condições de intemperismo mais intenso que lixiviariam parte do urânio presente nas rochas em processo de alteração intempérica, enquanto o tório, menos móvel, seria concentrado na forma de minerais resistentes detríticos ou adsorvido em óxidos/hidróxidos de ferro e em minerais de argila.

### **3.2.3 Resposta radiométrica dos depósitos minerais**

É necessário para caracterizar um depósito que a acumulação de minerais apresente concentrações anômalas dos elementos que são objeto de estudo. Os depósitos de urânio irão apresentar uma forte resposta radiométrica para este elemento, da mesma maneira que depósitos de minerais pesados apresentam elevada concentração de tório. De outra forma, os processos relacionados com alteração hidrotermal promovem localmente um aumento nas concentrações de potássio e fazem com que a rocha alterada seja mais suscetível à ação do intemperismo, proporcionando uma resposta radiométrica diferente daquela que ocorre com as rochas inalteradas ao seu redor. Alterações na concentração de radioelementos podem estar relacionadas tanto com a mineralização primária quanto com processos secundários de enriquecimento.

A técnica residual é caracterizada por realçar variações súbitas na abundância dos radioelementos que podem estar associados a processos localizados de mineralização. Esta análise envolve o cálculo dos *backgrounds* de K, U e Th e sua posterior subtração deste *background* ao banco de dados original, resultando em valores residuais que irão realçar as variações dos radioelementos. Se os alvos de exploração são depósitos de radioativos, esta análise emprega processos estatísticos para determinação dos níveis base de concentração dos elementos U e Th, característicos para as distintas unidades radiométricas delineadas nos mapas geofísicos de interpretação. A posterior seleção de valores anômalos se dá entre aqueles alvos que excedam pelo menos três vezes o nível base estabelecido.



Quando se tratam de depósitos de sulfetos maciços, estes podem estar associados à alteração hidrotermal, a qual promove a elevação da concentração de potássio, tornando este elemento um bom indicador para tais depósitos. Da mesma forma, o conteúdo de potássio é comumente elevado nas rochas hospedeiras de processos de mineralização em depósitos tipo pórfiro de ouro e cobre. Uma elevação na concentração de potássio relativa a outros indicadores sugere a presença de uma intrusão ou de mineralização. A razão K/Th é um indicador mais efetivo do enriquecimento em K, dado que este processo não altera as contagens de Th no ambiente do depósito.

Em depósitos gigantes do tipo IOCG (*Iron Oxided Copper - Gold*), o urânio está presente em concentrações não desprezíveis, associado à mineralização de ferro, cobre e ouro. As alterações potássicas também são reconhecidas neste tipo de depósito, mas a resposta geofísica adequada para sua busca dependerá da exposição da capa de alteração residual associada à zona mineralizada.

#### **3.2.4 Princípios da Magnetometria**

O levantamento magnético investiga a geologia com base nas anomalias do campo magnético terrestre resultantes das propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície, pelo fato de que mesmo que a maioria dos minerais formadores de rochas não seja magnético, algumas rochas contêm minerais magnéticos o suficiente para produzir anomalias magnéticas significativas. Do mesmo modo, os objetos ferrosos feitos pelo homem também geram anomalias magnéticas. Logo o método possui uma ampla gama de aplicações, desde grandes escalas para engenharia ou arqueologia, até levantamentos de grande porte, como estruturas geológicas regionais. Pode ser realizado em inúmeros ambientes, mar, terra, água, e, por conseguinte é uma técnica bastante empregada, principalmente os aerotransportados, cujo custo operacional é até 40% menor e apresenta uma alta velocidade de operação, quando comparados aos levantamentos terrestres, na busca por depósitos minerais que contenham minerais magnéticos.

### 3.2.4.1 O campo magnético terrestre e suas componentes

O campo geomagnético exibe variações irregulares em orientação e magnitude com a latitude, a longitude e o tempo. Em qualquer ponto da superfície da Terra, uma agulha magnética suspensa assumirá uma posição no espaço na direção do campo geomagnético ambiente, fazendo um ângulo com a vertical e o norte geográfico. Para a descrição do vetor campo magnético são usados elementos ou componentes geomagnéticos (Figura 7). O vetor campo total  $F_e$  possui uma componente vertical  $Z_e$  e uma horizontal  $H_e$  na direção do norte magnético. O mergulho de  $F_e$  é a inclinação  $I$  do campo, e o ângulo horizontal entre o norte geográfico e o magnético é a declinação  $D$ .  $F_e$  varia, em intensidade, de cerca de 25000 nT nas regiões equatoriais a cerca de 70000 nT nos polos.

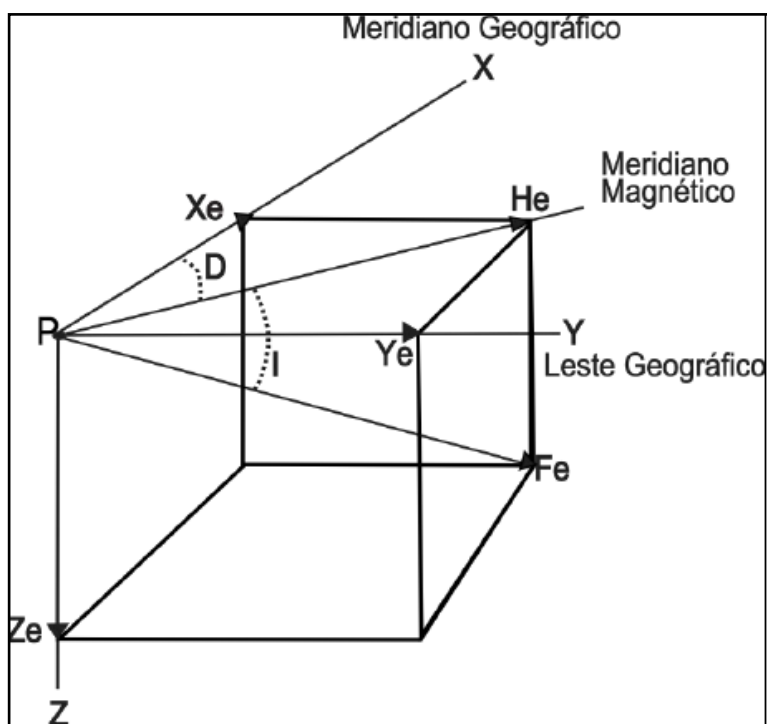


Figura 7: As componentes geomagnéticas. Modificado de Kearey et al. (2009).

O campo magnético terrestre pode ser representado de forma muito semelhante a um campo produzido por um momento de dipolo localizado no seu

centro. Esse momento aponta para o sul geográfico e se localiza sobre um eixo que forma um ângulo de aproximadamente  $11,5^\circ$  com o eixo de rotação da Terra. O eixo de dipolo terrestre define os polos geomagnéticos, que não devem ser confundidos com os verdadeiros polos magnéticos, definidos nas posições onde uma agulha magnetizada inclina-se com ângulo de  $90^\circ$  em relação à superfície da Terra. O equador geomagnético e o equador geográfico não coincidem e nem são paralelos, mas o equador geomagnético também divide a Terra em dois hemisférios, denominados de norte e sul, em analogia aos hemisférios geográficos. De acordo com Telford *et al* (1976), o Campo Magnético Terrestre medido em qualquer ponto da superfície corresponde à sobreposição de três componentes distintas: a primeira tem como origem o núcleo externo e designa-se por campo magnético principal; a segunda tem como origem os fenômenos físicos que ocorrem na ionosfera e no exterior da Terra e designa-se por campo externo; e a terceira tem como fonte a interação com as formações geológicas, que constituem no essencial a crosta (e eventualmente parte do manto superior) e designa-se por campo crustal.

### 3.2.4.2 Magnetismo de rochas e minerais

O magnetismo dos materiais resulta do movimento dos elétrons dentro de suas órbitas e ao redor de seu núcleo. Os elétrons realizam movimento em torno de seu eixo de rotação, que apresenta uma orientação espacial (*spin*) característica, que pode ou não se alinhar no mesmo sentido que um campo magnético externo aplicado  $\mathbf{H}$ , gerando ou não um campo magnético induzido  $\mathbf{M}_i$ :

$$\vec{M} = \kappa \vec{H} \equiv (\text{SI}), \vec{M} = \chi \vec{H} \quad (m^3/\text{kg}) \quad \text{Equação 1}$$

no qual  $K$  é a susceptibilidade magnética, grandeza adimensional, e  $\chi$  é a susceptibilidade normalizada pela massa, e ambas representam a capacidade do material em adquirir magnetização.

De acordo com sua capacidade de magnetização, os materiais podem ser classificados em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Os

materiais diamagnéticos são caracterizados por valores de suscetibilidade magnética baixa e negativa, em virtude da magnetização nula, resultante da orientação contrária dos spins na presença de H (Telford *et al.* 1976). A Tabela 6 mostra que os minerais diamagnéticos são principalmente os silicatos.

Tabela 6: Susceptibilidade magnética dos minerais diamagnéticos. Extraído de Schön (2004).

<b>Minerais</b>	<b>K (10<sup>-6</sup>)</b>
Ortoclásio	-12,5
Zircão	-10
Quartzo	-12,4
Anidrita	-59,3
Galena	-33,4
Esfalerita	-13,5
Aragonita	-15,2
Calcita	-13
Dolomita	-38
Halita	-10,4
Apatita	-10,6
Diamante	-21,7
Fluorita	-24

Nos materiais paramagnéticos, os *spins* se orientam no mesmo sentido que H, porém fazem isso de forma desorientada, o que resulta numa magnetização fraca. Essas características dos spins fazem com que os minerais paramagnéticos apresentem valores de suscetibilidade baixos e positivos. Esses valores compreendem principalmente os constituintes máficos das rochas. A Tabela 7, ilustra os principais minerais paramagnéticos.

Os materiais ferromagnéticos são caracterizados por apresentarem magnetização mesmo na ausência de H. Quando esses materiais estão na

presença de H, os *spins* tendem a orientar-se na mesma direção e de uma forma muito próxima, implicando os maiores valores de susceptibilidade magnética.

Tabela 7: Susceptibilidade magnético dos minerais paramagnéticos. Extraído de Schön (2004).

<b>Minerais</b>	<b>K (10<sup>-6</sup>)</b>
Olivina	990
Anfibólio	1570
Piroxênio	1500
Granada	2600
Biotita	1500
Muscovita	226
Clorita	356
Turmalina	560
Dolomita	1080

A magnetita é de longe o mineral magnético mais comum, com uma temperatura Curie de 578°C. Embora o tamanho dos grãos magnéticos em uma rocha afete seu caráter magnético, é razoável classificar o comportamento magnético das rochas de acordo com seu conteúdo global de magnetita. A Tabela 8 compara alguns valores de susceptibilidade magnética em alguns grupos de rochas.

Tabela 8: Susceptibilidade magnética de alguns grupos de rochas. Extraído de Robinson (1988).

<b>Rochas ígneas</b>	<b>Susceptibilidade magnética (<math>10^3</math>)</b>
Granitos	0 a $50 \times 10^3$
Riolito	0,2 a $35 \times 10^3$
Pórfiro	0,3 a $200 \times 10^3$
Basaltos	0,2 a $175 \times 10^3$
Peridotitos	90 a $200 \times 10^3$
<b>Rochas metamórficas</b>	
Xisto	0,3 a $3 \times 10^3$
Gnaisse	0,1 a $25 \times 10^3$
Quartzito	0 a $4 \times 10^3$
Ardósia	0 a $35 \times 10^3$
<b>Rochas sedimentares</b>	
Dolomita	0 a $0,9 \times 10^3$
Calcário	0 a $3 \times 10^3$
Arenito	0 a $20 \times 10^3$
Folhelho	0,01 a $15 \times 10^3$

### 3.3 Aquisição de dados Aéreos

O trabalho utilizou os dados do levantamento aéreo requisitado pela CPRM e realizado pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S/A no período de 20/02/2010 a 10/08/2010 e que contemplou a aerogamaespectrometria e a aeromagnetometria no Escudo do Rio Grande do Sul, totalizando uma área de cerca de 75.600,00 km<sup>2</sup>, como mostra a Figura 2 deste trabalho. A direção das linhas de voo seguiram N-S com espaçamento de 500 metros, e as linhas de controle com direção E-W com espaçamento de 10 Km. A altura média de vôo foi de 100 metros e o intervalo de medições consecutivas geofísicas foram de 0,1 segundos para o magnetômetro (6,3 metros no terreno), com resolução de

0,001 nT, e 1 segundo para o espectrômetro (65 – 75 metros no terreno). A Tabela 9 mostra os equipamentos utilizados durante o levantamento:

Tabela 9: Equipamentos utilizados. Extraído de relatório técnico LASA. (2010).

<b>Prefixo da aeronave</b>	<b>PR-SSB</b>	<b>PT-MOT</b>	<b>PT-WOT</b>
Fabricante da Aeronave	Cessna	Cessna	Piper
Aeromagnetômetro	Scintrex CS-2	Scintrex CS-2	Scintrex CS-2
Gamaespectrômetro	Radiation Solutions Inc./RS500	Exploranium GR-820	Exploranium GR-820
Volume dos Cristais Detectores de Iodeto de Sódio	2.048 pol <sup>3</sup> <i>down</i> e 512 pol <sup>3</sup> <i>up</i>	2.048 pol <sup>3</sup> <i>down</i> e 512 pol <sup>3</sup> <i>up</i>	2.560 pol <sup>3</sup> <i>down</i> e 512 pol <sup>3</sup> <i>up</i>
Sistema de Navegação	FASDAS	FASDAS	FASDAS
Sistema de Aquisição GPS	Trimble AgGPS 132 DGPS "Realtime"	Trimble AgGPS 132 DGPS "Realtime"	Trimble AgGPS 132 DGPS "Realtime"
Câmera de Vídeo	Panasonic WV-484	Sony DXC-107A	Panasonic WV-484
Radar Altímetro	King - 405	Collins ALT-50	Collins ALT-50
Altímetro Barométrico	Fugro/Enviro	Fugro/Enviro	Fugro/Enviro
Magnetômetro terrestre	GEM Systems GSM-19	GEM Systems GSM-19	GEM Systems GSM-19
Sistema de Aquisição	FASDAS	FASDAS	FASDAS

O processamento dos dados do projeto empregou o *software OASIS MONTAJ* versão 7.1.1 do sistema GEOSOFT (OMG), além das rotinas de pré-processamento pertinentes, que permitem a exportação do dado binário coletado em voo para formato ASCII XYZ GEOSOFT. Os dados brutos gravados em formato binário na aeronave são convertidos diretamente para bancos de dados no formato de GDB's compatíveis com o OASIS MONTAJ, onde estão agrupadas informações de posicionamento corrigidas e todos os demais canais de informação registrados a bordo da aeronave. O banco de dados é preparado

para que fique do tipo XYZ, onde Z corresponde a cada uma das variáveis medidas a bordo da aeronave e XY as coordenadas UTM do ponto em que a medida foi tomada, o processamento é então iniciado com a correção dos dados magnetométricos e radiométricos propriamente.

### 3.3.1 Aerogamaespectrometria

O espectrômetro aerotransportado calcula a contagem total da radiação e cada elemento pode ser identificado de acordo com a janela de energia para cada um dos três radioelementos, como podemos observar na Tabela 10:

Tabela 10: Intervalo de detecção dos radioelementos e seus picos de energia. Modificado de Ribeiro *et al* (2014).

Canal	Faixa de Energia (Mev)	Pico de Energia (Mev)
$^{40}\text{K}$	1,37 – 1,57	1,46
$^{238}\text{U}$	1,66 – 1,86	1,76
$^{232}\text{Th}$	2,41 – 2,81	2,61
CT	0,40 – 2,81	-

Porém os dados aerotransportados necessitam passar por correções antes de sua utilização nos mapas de concentração dos elementos. Para tal, é necessária uma rotina computacional onde as leituras computadas sejam convertidas em intensidades de radiações dos elementos encontrados na natureza. Estas correções foram feitas pela empresa responsável pelo levantamento e seguiram os parâmetros recomendados na seção 4 do relatório técnico, série 323 da Agencia Internacional de Energia Atômica (IAEA). Foi empregada a rotina contida no sistema de processamento radiométrico OASIS-RPS da GEOSOFT. A seguir estas correções serão abordadas de forma sucinta, mas que venha a elucidar os principais fundamentos aplicados pela empresa. As informações foram extraídas do Relatório técnico do Levantamento do Escudo do Rio Grande do Sul de 2010 da empresa LASA, responsável pela aquisição.



### 3.3.1.1 Correção do tempo morto

Alguns equipamentos possuem uma lacuna ou um tempo necessário entre uma medida e a obtenção da próxima medida. Este período ocioso é chamado de Tempo Morto. A correção utiliza a razão das contagens totais registradas pelo valor do tempo total na medida, corrigindo os valores brutos de contagem por segundo nos diferentes canais. Consiste basicamente na divisão das contagens dos canais radiométricos pelo valor do *live time* registrado pelo aparelho, normalizando, assim, os valores brutos dos canais da contagem total, potássio, urânio, tório e urânio *upward* para contagens por segundo.

### 3.3.1.2 Aplicação de filtragem

Isto se aplica somente aos dados afetados por variações de alta frequência, quais sejam: dados do radar altímetro, do canal de radiação cósmica e do canal de urânio *up*, utilizado no cálculo da influência do radônio nas medições realizadas. São aplicados dois tipos de filtragem, dependendo do comportamento dos dados:

- Filtragem não linear permite a remoção de *spikes* nos dados e a compensação de variações abruptas do radar altímetro;
- Filtragem do tipo passa-baixa reduz o erro estatístico nos dados da radiação cósmica, suaviza o comportamento do radônio, opcionalmente, é aplicado aos demais canais radiométricos com objetivos específicos, como o cálculo das razões radiométricas.

### 3.3.1.3 Correção do erro de paralaxe

Não foram encontrados erro de paralaxe nos dados radiométricos coletados pelas aeronaves PR-SSB, PT-MEP e PT-WOT.

### 3.3.1.4 Cálculo da altura efetiva de voo

Existem inúmeras irregularidades no terreno que não permitem que a altura de voo seja constante. Logo essa variação é ajustada com base na temperatura e pressão ambientais, sendo necessário a disponibilidade de dados de radar altímetro, pressão atmosférica e temperatura, obtida pela altitude média do altímetro barométrico. O cálculo utiliza a seguinte equação:

$$He = h \left( \frac{273,15}{T} + 273,15 \right) \left( \frac{P}{273,15} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

No qual:

He - altura efetiva de voo;

h - altura de voo medida pelo radar altímetro em metros;

T - temperatura do ar em graus Celsius;

P - pressão atmosférica em milibar.

### 3.3.1.5 Remoção da Radiação de Fundo da Aeronave e Cósmico

As partículas de alta energia de raios cósmicos que interagem com os átomos da atmosfera causam a radiação de fundo cósmico. Além desta, existe ainda a radiação gerada pela própria aeronave, sendo que o espectro do ruído é dado pela seguinte equação:

$$NAC = a + b \times c \quad \text{Equação (3)}$$

No qual:

$N_{AC}$  - radiação de fundo para cada uma das janelas espectrais, combinadas a cósmica e da aeronave;

a – radiação de fundo da aeronave na janela utilizada;

b – fator de espalhamento cósmico. É adquirido em voos realizados sobre grandes lâminas d'água como lagos e o oceano, onde a radiação terrestre sofre bloqueio pelo efeito da blindagem de água;

c – canal com as contagens de radiação cósmica filtradas.

### 3.3.1.6 Remoção da radiação de fundo do Radônio atmosférico

Os elementos filhos do Radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) atmosférico sofrem decaimento produzindo um espectro idêntico ao do decaimento do Urânio. Em um levantamento aéreo, existem alguns fatores que variam, como a pressão do ar, velocidade e direção do vento, temperatura e umidade do solo, que são condicionantes para a difusão do Radônio, tornando a correção muito complicada. Utiliza-se uma técnica com detectores voltados para cima e configurados para o canal do Urânio. Trata-se de um detector parcialmente blindado para radiações oriundas abaixo dele, ignorando assim as radiações vindas do terreno e detectando as atmosféricas, de modo que, pode-se remover o ruído de fundo de radônio detectado *downward*, utilizando-se a técnica dos coeficientes *skyshine* ( $A_1$  e  $A_2$ ) e as constantes de calibração do radônio atmosférico ( $a_{TC}$ ,  $a_K$ ,  $a_{UP}$ ,  $a_{TH}$ ,  $b_{TC}$ ,  $b_K$ ,  $b_{UP}$ ,  $b_{TH}$ ), no qual  $A_1$  e  $A_2$  são determinados pela equação:

$$ug = A_1 \times U_g + A_2 \times T_g \quad \text{Equação (4)}$$

$ug$  – contribuição do solo na janela do radônio atmosférico;

$U_g$  – contribuição do solo na janela do Urânio;

$T_g$  – contribuição do solo na janela do tório.

Sendo que  $u_g$ ,  $U_g$  e  $T_g$  são calculados independentemente de  $A_1$  e  $A_2$  utilizando-se a técnica dos mínimos quadrados:

$$A_1 \times \Sigma(U_g)^2 + A_2 \times \Sigma U_g \times T_g = \Sigma u_g \times U_g \quad \text{Equação (5)}$$

$$A_1 \times \Sigma U_g \times T_g + A_2 \times \Sigma(T_g)^2 = \Sigma u_g \times T_g \quad \text{Equação (6)}$$

No qual:

$ug$  – contribuição do solo na janela do urânio *up*;

$U_g$  – contribuição do solo na janela do urânio *down*;

Tg - contribuição do solo na janela do tório *down*;  
a1 e a2 - constantes de calibração requeridas.

O cálculo do coeficiente a, utiliza dados prévios de testes realizados na área do levantamento, denominado *high level test*, executados em altura padrão de 2500 pés de altura sobre o terreno. Os coeficientes são obtidos por regressão linear e os valores constam na Tabela 11:

Tabela 11: Coeficientes de contribuição do Radônio. Extraído de CPRM (2010).

CANAL	COEFICIENTE	PR-SSB	PT-MEP	PT-WOT
Contagem Total	$a_{tc}$	17,3880	14,5610	14,8740
Potássio	$a_k$	0,9627	0,7995	0,8239
Urânio <i>up</i>	$a_u$	0,2313	0,2262	0,1580
Tório	$a_t$	0,1986	0,0718	0,1260

A partir destes dados, chega-se a equação 7, utilizada para o cálculo do radônio atmosférico:

$$Ur = \frac{(uUp - A1 \times U - A2 \times Th + A2 \times bTh - bUp)}{(aUp - A1 - A2 \times aTh)} \quad \text{Equação (7)}$$

No qual:

Ur – componente do radônio atmosférico;

Uup – contagem do canal urânio após a remoção de fundo cósmica e aeronave;

U – contagem do canal urânio após a remoção de fundo cósmico e aeronave;

Th – contagem de tório após a remoção de fundo cósmico e aeronave.

$a_{Th}$  – razão entre as janelas *downward* Th e U;

$a_{Up}$  – razão entre as janelas *upward* e *downward* de U;

Posteriormente é feita a avaliação do componente do radônio associado a cada um dos canais, com os valores equivalentes a cada janela que expressam

a relação entre os detectores (*upward* e *downward*) e utiliza as seguintes fórmulas (IAEA, 1991):

$$Ur = auUr + bup \quad \text{Equação (8)}$$

$$Kr = AkUr + bk \quad \text{Equação (9)}$$

$$Tr = atUr + bt \quad \text{Equação (10)}$$

$$TCr = atcUr + btc \quad \text{Equação (11)}$$

No qual:

$Ur$  - é a componente do radônio *up*.

$Ur$ ,  $Kr$ ,  $Tr$  e  $TCr$  - são as contribuições do radônio nas demais janelas associadas ao detector *downward*.

$a_{TC}$  - razão entre as janelas *downward* CT e U;

$a_K$  - razão entre as janelas *downward* K e U;

$b_{TC}$  - canal CT intercepta o canal U;

$b_K$  - canal K intercepta o canal U;

$b_{Th}$  - canal Th intercepta o canal U;

$b_{Up}$  - canal do U atmosférico intercepta o canal U.

### 3.3.1.7 Correção do efeito Compton

O objetivo principal é eliminar a influência das radiações atribuídas aos canais de mais alta energia que penetram nos canais de baixa energia, contribuições do tório no urânio e no potássio, assim como a contribuição do urânio no potássio. Os sistemas de alta resolução, em uso atualmente, consideram também as influências de radiações de baixa energia nas janelas de energia mais alta, resultando, desta forma, nos seis coeficientes abaixo:

$\alpha$  - radiações de tório no urânio;

$\beta$  - radiações de tório no potássio;

$\gamma$  - radiações de urânio no potássio;

$a$  - radiações de urânio no tório;

$b$  - radiações de potássio no tório;

$g$  - radiações de potássio no urânio.

### 3.3.1.8 Correção Altimétrica (Coeficiente de Atenuação Atmosférica)

Esta correção tem o objetivo de referenciar os valores radiométricos à altura nominal do aerolevante (100 m), eliminando falsas anomalias ocasionadas por elevações no terreno. A atenuação das radiações gama em relação ao afastamento da fonte é expressa matematicamente, de forma aproximada, pela fórmula (IAEA, 1991):

$$NH = No, e^{-\mu h} \equiv \ln(NH) = -\mu H + \ln(No) \quad \text{Equação (12)}$$

No qual:

NH – radiação a distância H da fonte;

No – radiação na superfície do terreno, onde H é 0;

$\mu$  - coeficiente de atenuação atmosférica.

Os coeficientes de atenuação atmosférica ( $\mu$ ) utilizados estão dispostos na tabela 12:

Tabela 12: Coeficientes de Atenuação Atmosférica. Extraídos de CPRM (2010).

<b>Canal Radiométrico</b>	<b>PR-SSB (13/02/10)</b>	<b>PT-MEP (15/05/10)</b>	<b>PT-WOT (20/01/10)</b>
Contagem Total	-0,0066	-0,0071	-0,0072
Potássio	-0,0092	-0,0090	-0,0094
Urânio	-0,0072	-0,0078	-0,0074
Tório	-0,0063	-0,0071	-0,0072

### 3.3.1.9 Conversão para Concentração de Elementos

Os elementos potássio, urânio e tório, são capazes de determinar as sensibilidades dos detectores das aeronaves que foram determinadas com base nas razões entre as medições efetuadas a bordo (N) e em terra (C), nos testes conduzidos na pista de calibração dinâmica, com a aplicação da equação 13:

$$S = N/C$$

Equação  
(13)

No qual:

**S** - corresponde à sensibilidade para cada janela;

**N** - é a média das contagens corrigidas (em cps) para cada canal referente à altura do levantamento (100 m) e situada no trecho de interesse das estações terrestres utilizadas;

**C** - é a média das concentrações para cada canal das estações terrestres de interesse.

Os coeficientes de sensibilidade podem ser observados na tabela 13:

Tabela 13: Coeficiente de sensibilidade. Extraído de CPRM (2010).

<b>SENSIBILIDADE</b>			
<b>Canal Radiométrico</b>	<b>PR-SSB (13/02/10)</b>	<b>PT-MEP (15/05/10)</b>	<b>PT-WOT (20/01/10)</b>
Contagem Total (cps / $\mu$ R/h CT)	147,14	164,61	222,05
Potássio (cps / %K)	52,14	53,07	75,12
Urânio (cps / ppm eU)	7,64	10,14	11,21
Tório (cps / ppm eTh)	2,79	3,66	5,06

Para calcular a “taxa de exposição” (*Exposure Rate*) do canal de contagem total (em  $\mu$ R/h) utiliza-se a seguinte equação (IAEA, 1991):

$$E = 1,505K + 0,653eU + 0,287eTh$$

Equação  
(14)

No qual:

K, eU e eTh correspondem às concentrações aparentes destes elementos definidas em terra, quando do levantamento da pista de calibração dinâmica,

sendo que os valores da concentração determinados para o canal de contagem total na pista de calibração foram 16,36  $\mu\text{R/h}$  (PR-SSB), 13,67  $\mu\text{R/h}$  (PT-MEP), 13,52  $\mu\text{R/h}$  (PT-WOT).

### 3.3.2 Aeromagnetometria

Os dados são corrigidos, assim como a gamaespectrometria, em fase preliminar ao processamento, de modo a eliminar os erros e incertezas durante o levantamento, e são feitos pela empresa responsável pelo levantamento. A seguir segue de forma sucinta as correções realizadas pela empresa LASA e extraídos do Relatório Final do Levantamento e Processamento de dados Magnetométricos e gamaespectrométricos (CPRM 2010).

#### 3.3.2.1 Correção do Erro de Paralaxe

O erro de paralaxe diz respeito à defasagem nos tempos de medição do magnetômetro e altímetros com o sistema de posicionamento. Logo, o erro de paralaxe é determinado a partir de uma linha de vôo, em sentidos opostos sobre uma mesma feição magnética anômala reconhecida no terreno. A correção a ser aplicada corresponde ao valor deslocado do tempo de amostragem, de maneira que as duas feições se tornem coincidentes. A seguinte equação é utilizada:

$$F_c(t_0) = F_c(t_0 \pm I_p) \quad \text{Equação (15)}$$

No qual:

$F_c$  - Valor do Campo Magnético Total corrigido do erro paralaxe;

$T_0$  - Tempo da Amostragem;

$I_p$  - Valor do Intervalo de Tempo a ser deslocado no banco de dados.



### 3.3.2.2 Remoção da Variação Magnética Diurna

O magnetômetro monitor obtém valores, que foram inicialmente subtraídos das leituras do campo magnético realizadas a bordo da aeronave, apresentando variável comum a hora de amostragem, que é fixada com precisão de décimos de segundo. As diferenças positivas ou negativas, foram somadas algebricamente ao nível base, definido em 28.708 nT para toda a área. Os valores resultantes representam a intensidade total do campo magnético corrigido da variação diurna.

### 3.3.2.3 Nivelamento dos Perfis

O procedimento compreende duas formas distintas conforme segue:

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

O próximo passo é criar uma Tabela de Interseções que contém as diferenças entre as linhas de controle niveladas e a linhas de vôo nos pontos de cruzamento. Este procedimento é conduzido pelo procedimento XLEVEL GX. Os valores são armazenados no banco de dados e utilizados no cálculo das correções a serem aplicadas às linhas de vôo, e os cruzamentos onde o gradiente magnético excedeu a 2 nT/fiducial (0,025 nT/m) são descartados pelo programa. Com base neste gradiente, o programa analisou também, as interseções quanto à sua aplicabilidade, atribuindo peso mais baixo, quanto mais alto fosse o gradiente. Deste modo, uma interseção situada em uma zona de forte gradiente magnético teve pouca ou nenhuma influência no nivelamento.

### 3.3.2.4 Micronivelamento dos Perfis

Os dados do levantamento foram micronivelados para a eliminação de qualquer resíduo de “desnivelamento” que tenha permanecido nos dados. O processo envolveu a geração de dois *grids* auxiliares, resultantes da aplicação de filtros passa-alta tipo *Butterworth* (comprimento de onda da ordem de 4 vezes o espaçamento das linhas de vôo) e cosseno direcional atuando na direção das linhas de vôo e perpendicularmente a elas, seguindo-se, então, a criação de um *grid* final decorrugado, que resultará do somatório dos *grids* produzidos em etapas distintas. Este último, subtraído de um *grid* normal irá, por sua vez, expressar o erro de nivelamento a ser subtraído aos dados pré-nivelados conforme o procedimento inicial citado acima.

### 3.3.2.5 Remoção do IGRF

A remoção do *Interbational Geomagnetic Reference Field* (IGRF) atendeu à rotina incluída no Sistema OMG, que consiste na definição da superfície de tendência que expressa o comportamento do campo geomagnético internacional na área do projeto. Esta superfície foi definida com base no valor do IGRF, tendo sido considerada a altitude de 200 m, referida ao ano de 2010 e atualizada para a data de 09/05/2010. O campo magnético total corrigido para cada um dos pontos amostrados foi obtido pela subtração, ao campo total micronivelado, do valor do IGRF calculado para o ponto. Os valores resultantes correspondem aos valores anômalos do campo (campo magnético total reduzido do IGRF).

## 3.4 Aquisição de dados terrestres

O trabalho de campo foi realizado entre os dias 25 a 27 de setembro de 2017 nas proximidades do município de Amaral Ferrador, na Mina Galena, cuja extração mineral está interrompida desde o início do ano 2000. O trabalho contou com o apoio de motorista da UFRGS, Claudio, conduzindo um veículo Ranger do Instituto de Geociências. Contribuíram também com a utilização dos

equipamentos o professor de Geofísica da UFRGS Jairo Savian e a aluna de mestrado Carolina Leandro.

O GPS foi configurado para gravar os pontos e a trilha no Datum WGS-84 e na projeção UTM (Universal Transversa de Mercator). As configurações de aquisição de dados do gamaespectrômetro de marca *RS 125 Super Spec da Radiations Solutions*, foram feitas no modo *ASSAY*, com tempo de integração de dados foi de 60 segundos para cada medição. Em cada ponto da malha foram realizadas duas medidas tanto com o gamaespectrômetro, quanto com o magnetômetro. Ao final do tempo o Gamaespectrômetro registra os valores de contagem total em contagem por minuto, K em porcentagem, equivalente Th e U em partes por milhão (ppm), com base em procedimentos de calibração realizados pelo próprio fabricante do instrumento. A coleta foi feita aproximadamente a cada 20 metros em malha irregular, totalizando 155 pontos amostrados. O modo de operação do equipamento, Figura 8, é bastante simples, sendo acionado diretamente sobre o local a ser medido, preferencialmente sobre o afloramento rochoso, mas não necessariamente. No caso deste trabalho foram feitas análises quando possível sobre a rocha exposta, mas também sobre solo.



Figura 8: Utilização do Gamaespectrômetro.

Os dados magnetométricos terrestres foram adquiridos com o emprego de dois magnetômetros de precessão de prótons da *GEM System Inc Canadá*, modelo GST19, cedidos gentilmente pela CPRM. Um deles foi posicionado em uma estação base Figura 9B a fim de registrar a variação diurna do campo geomagnético e o outro, chamado itinerante (Figura 9A), foi utilizado de maneira itinerante, realizando as medidas ao longo da área de estudo. No total foram adquiridos 155 pontos de medidas. O magnetômetro base permanece no mesmo local durante toda a coleta de pontos, orientado para o norte magnético. Referente ainda aos dados da estação base, o magnetômetro permite a opção de gravar os dados com intervalos de tempo previamente selecionados, sendo adotado para esse estudo, leituras do campo a cada 3 segundos. O magnetômetro itinerante acompanha a malha de pontos bastando orientar o mesmo para o norte magnético durante as medidas.



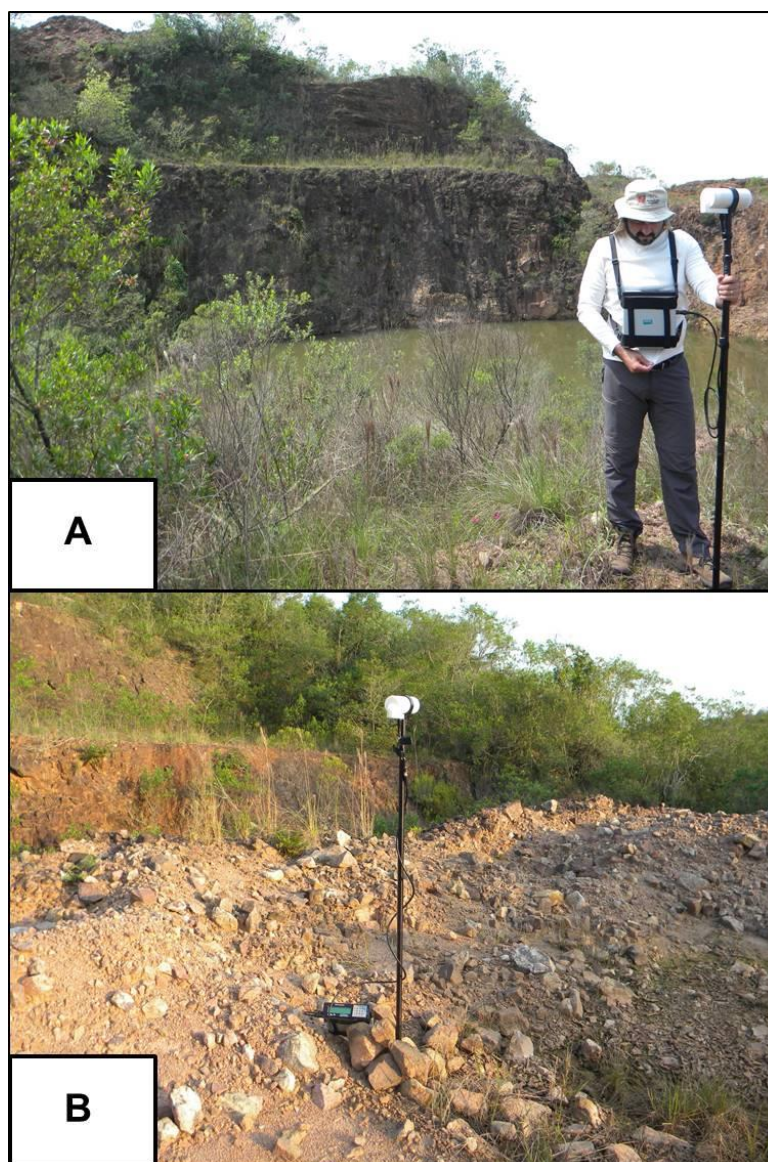


Figura 9: A - Magnetômetro itinerante em uso. B - Magnetômetro base em uso.

### 3.4.1 Gamaespectrometria

Como dito anteriormente as leituras do gamaespectrômetro foram feitas a cada 1 minuto, sendo que foram realizadas duas medições em cada ponto de amostragem. Os dados adquiridos são armazenados no próprio equipamento, sendo descarregados posteriormente diretamente no computador. Os dados foram então abertos em planilha *Microsoft excel* para o trabalho, de modo que cada coluna ganhou um valor na seguinte ordem: identificação do ponto,

coordenadas x, y, elevação conforme Gps, contagem total, K %, eU, eTh. Como foram realizadas duas medidas, o valor de cada ponto amostrado foi obtido pela média simples do ponto. O software *Oasis Montaj Geosoft (OMG)* possui ferramentas de operações entre as colunas, porém optou-se por levar os dados prontos ao programa. Desta forma, foram criadas mais quatro colunas que representam as razões entre os elementos: U/Th, U/K, Th/K e Fator F. Maiores detalhes sobre as razões e sobre os elementos, podem ser encontradas no Capítulo 3.2.2 que tratou sobre o comportamento dos radioelementos nas rochas.

Os dados Gamaespectrométricos terrestres são bastante simples de processar, e sua utilização no software não requer filtros ou correções. É necessária a conversão do arquivo xls para xyz ou GDB que são as formas de trabalho do *software* *OMG*. Estas operações são realizadas dentro da plataforma de base de dados do *OMG*, onde ocorre a conversão de extensão conforme o desejado. O próximo passo é a geração dos mapas, ou conforme chamado dentro da plataforma de trabalho, *GRID*. Para tal foi utilizada recomendação do próprio manual de utilização do *OMG*, que prevê a formação dos GRIDS, a partir do banco de dados utilizando a operação de mínima curvatura. Os mapas são gerados individualmente e por canal de interesse. A planilha do levantamento está disponível para consulta na parte anexa do trabalho.

#### 3.4.1.1 Fator *F*

Segundo Gnojek & Prichystal (1985), é possível também analisar a razão entre os elementos radiométricos a partir do cálculo do parâmetro *F* o qual é definido pela equação 16:

$$F = K \times \frac{eU}{eTh} \quad \text{Equação (16)}$$

O enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório é realçado pelo mapa do parâmetro *F*, principalmente quando associado a áreas com alteração hidrotermal.

Em áreas que apresentem forte intemperismo e alta lixiviação do potássio, a tendência é que apresentem valores para o parâmetro F muito baixos, enquanto, que em maciços rochosos que foram submetidos ao enriquecimento de potássio e urânio por alteração hidrotermal, a tendência é apresentar altos valores.

#### **3.4.1.2 Mapa ternário**

O mapa ternário é baseado nos radioelementos K, eTh e eU, e permite evidenciar dois ou os três destes. Conforme Ribeiro et al (2014), o mapa ternário é gerado ao associarmos uma determinada cor á cada um dos radioelementos dependendo do padrão de coloração utilizado, RGB ou CMY. O padrão RGB associa as cores vermelho, verde e azul (Red, Green, Blue) respectivamente ao potássio em %, tório e urânio em ppm. O padrão CMY por sua vez, considera para a composição do mapa, as cores ciano, magenta e amarelo (Cyan, Magenta, Yellow). As cores são associadas a cada um dos elementos e cores em ambos os padrões, com gradações das cores variando de acordo com o teor de cada um dos elementos considerados. A cor branca representa altas contagens dos três elementos, enquanto que a cor preta é associada às baixas contagens dos mesmos. Da mesma forma que os mapas de razões, o mapa ternário é utilizado para ressaltar contrastes entre áreas com diferentes concentrações dos três elementos que podem não estar tão evidentes nos primeiros mapas, facilitando a interpretação dos dados.

#### **3.4.2 Magnetometria**

O trabalho da magnetometria seguiu os moldes da gamaespectrometria, realizando duas medidas por ponto de amostragem. O diferencial na aquisição dos dados é que se utilizam dois magnetômetros de precessão de prótons durante o trabalho: uma estação base e uma itinerante ou *ROVER*. O magnetômetro base é posicionado em um local afastado de possíveis fontes magnéticas, que podem ser externas como veículos, cercas elétricas ou redes de alta tensão, ou internas, que pode ser uma rocha com anomalia magnética

muito intensa. Este magnetômetro é o responsável por registrar a variação diurna do campo geomagnético. O equipamento permite fazer o registro em diferentes tempos, e para este trabalho optou-se por fazer o registro do magnetômetro base a cada 3 segundos. O magnetômetro itinerante é utilizado ao longo do levantamento e registra a variação local do campo.

Os equipamentos registram na memória os dados coletados e estes são descarregados em computador, no qual é construída planilha para o trabalho no *Microsoft Excel*. Os dados são separados por coluna que indicam: identificação do ponto, coordenadas X e Y, medidas do magnetômetro móvel, medidas do magnetômetro base, horário de coleta, altitude conforme GPS e a data do levantamento. O magnetômetro itinerante realizou duas medidas e fez-se uma média simples por ponto para obter o valor local. O magnetômetro base realizou uma medida a cada 3 segundos, portanto pegou-se os valores do intervalo de tempo utilizado pelo itinerante, para o cálculo da média do magnetômetro base. Foi inserida uma coluna com o valor do campo total, que será abordada no próximo capítulo quando será explicado o conceito de correção da variação diurna. Assim como no método radiométrico, portanto, optou-se por levar a planilha pronta para o *software*, cujo procedimento de exportação do banco de dados e geração do mapa de campo total segue os mesmos métodos do radiométrico.

O diferencial entre os métodos no processamento é que enquanto a gamaespectrometria não utilizou correções ou filtros, na magnetometria foi necessária realizar a correção da variação diurna e alguns procedimentos de filtragem. A correção e os filtros utilizados neste trabalho serão definidos nos próximos capítulos.

#### **3.4.2.1 Correção da variação diurna**

A estação base corresponde a uma unidade estacionária, logo as variações do campo magnético circundante são resultados da variação diurna ao longo do período de aquisição, em conjunto com ruídos antrópicos presentes no local. As leituras da estação itinerante são influenciadas tanto pela variação diurna como pelas variações locais do campo magnético em virtude das



anomalias presentes no local do levantamento. A correção diurna remove a influência da variação diurna do campo magnético, permitindo que somente as anomalias magnéticas relacionadas às fontes causadoras (rochas) sejam devidamente reconhecidas no levantamento executado. Os valores da estação base devem ser reduzidos dos dados magnéticos coletados no magnetômetro itinerante na área do levantamento em função do horário da aquisição e, em seguida, somados ao valor do campo magnético para a área (disponível em [www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm)), que para região entre os dias 25 a 27 de setembro de 2017, registrava 22521,2 nT. Após a correção diurna, o campo magnético, denominado de campo magnético corrigido, pode ser empregado nas etapas de geração dos demais mapas e filtros. A equação 17 mostra os elementos para o cálculo do Campo Total:

$$MAGcorr = Rover - Base + Datum \quad \text{Equação (17)}$$

No qual:

MAGcorr – campo magnético total corrigido;

Rover – valor do campo magnético de acordo com o magnetômetro itinerante;

Base – valor do campo magnético de acordo com o magnetômetro base;

Datum - valor do campo magnético terrestre, previamente conhecido do campo magnético da área de estudo.

### 3.4.2.2 Processamento dos dados magnéticos – Filtros

Os dados são processados com o objetivo de promover a melhoria da qualidade e representação de dados geofísicos para serem interpretados. O processamento pode ser feito em dados magnéticos e geralmente conta com a aplicação de filtros. Estes filtros são operações matemáticas que permitem aprimorar seus dados de acordo com cada necessidade e objetivo na interpretação. Os filtros melhoram a resposta dos dados, ressaltando anomalias sutis, ou delimitando bordas anômalas, ou mesmo identificando o pico destas anomalias. Não existe propriamente uma regra para a aplicação dos filtros, e como se tratam de operações matemáticas, é possível utilizar uma combinação

de filtros para ressaltar uma feição. Para este trabalho utilizou-se o manual de processamento magnetométrico da própria *Geosoft*. Segundo o manual, é possível utiliza uma sequência de até seis filtros consecutivos no programa em uma mesma operação. O mapa base ou guia, que serve para a implementação dos filtros é o de Campo Total, produzido com os dados de campo de acordo com a Equação 17. Os filtros são construídos dentro da plataforma *OMG*, com o auxílio da extensão *MAGMAP*. Alguns filtros possuem a necessidade de parâmetros minuciosamente especificados. A seguir serão definidos os filtros utilizados neste trabalho e estes parâmetros quando for o caso.

### 3.4.2.3 Filtro Redução ao Pólo Magnético – RTP

Segundo Telford (1976), o método RTP (*Reduction to Pole*), recalcula a intensidade dos dados como se estes estivessem localizados no polo, onde a magnetização induzida é vertical, com o objetivo de tornar independente da direção da indução do campo geomagnético, e é utilizado em áreas de altas e médias latitudes. A RTP auxilia na interpretação transformando uma anomalia de caráter dipolar, em uma anomalia monopolar, deslocando o máximo da anomalia, fazendo com que se localize exatamente em cima do corpo causador. A equação 18 é utilizada para o processamento:

$$RTP = \frac{[\sin(I) - I \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(la) + \cos^2(D - \theta)][\sin^2(I) + \cos^2(I) \cos^2(D - \theta)]} \quad \text{Equação (18)}$$

No qual:

RTP – é a redução ao polo;

$I$  – é a inclinação geomagnética;

$D$  – é a declinação do campo geomagnético na época do levantamento;

$la$  – é a inclinação para correção de amplitude;

$\theta$  – é a latitude polar.

O *RTP* se torna instável quando todo o denominador é igual ou próximo a zero, causando uma singularidade na equação. Por isso, este filtro torna-se instável quando é aplicado em dados de latitudes muito baixas.

#### 3.4.2.4 Filtro Continuação para Cima – UC

A UC (*Upward Continuation*) é uma operação de filtragem que permite suavizar o campo magnético anômalo total, e eliminar as anomalias de curto comprimento de onda, alta frequência, provocadas por fontes superficiais, além de manter as anomalias de maior comprimento de onda que podem estar associadas à presença de fontes magnéticas profundas. O procedimento simula a aquisição dos dados do campo magnético em um nível superior ao original, ou seja, dados mais afastados das fontes.

Para a construção da UC foi utilizada como base o mapa gerado em RTP. Os parâmetros necessários são adquiridos em procedimento interativo de cálculo de potência Radial dentro do próprio *software*. A altura de observação também é dada pelo espectro, mas, comumente, se utiliza a altura de 100 metros como base devido ao fato ser a altura média na aquisição de dados aéreos. De acordo com o manual de utilização do *OMG* (2009), a equação utilizada pela UC é a seguinte:

$$L(r) = e^{-hr} \quad \text{Equação (19)}$$

No qual são utilizados os seguintes parâmetros:

h – distância em unidades de medição, para continuar para cima relativamente ao plano de observação.

Lr – número de onda em radianos por unidades de medição:  $r=2\pi k$ , onde k está em ciclos por unidades de medição.

### 3.4.2.5 Filtro primeira e segunda derivadas – Dz e Dzz

O filtro de derivada vertical é aplicado nos dados de campos potenciais para realçar as fontes geológicas rasas. De forma geral, este filtro acentua os gradientes nas bordas dos corpos (Geosoft 2009). A equação de Dz é a seguinte:

$$Dz = \frac{\partial A}{\partial z} \quad \text{Equação (20)}$$

No qual:

Dz – primeira derivada vertical;

$\partial A$  – amplitude da anomalia;

$\partial z$  – direção vertical.

### 3.4.2.6 Filtro Amplitude do Sinal Analítico – ASA

Segundo Li (2006), o filtro ASA é utilizado no mapeamento de bordas de corpos. 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, e traz informações relevantes sobre a sua geometria (Nabighian 1974). Possui a característica de ter as amplitudes máximas em cima das bordas principalmente quando os corpos são rasos. Segundo Li (2006), com o aumento da profundidade, os valores máximos são deslocados. Ainda, Segundo Blakely (1996), o ASA consiste na combinação dos gradientes horizontal e vertical da anomalia. Seus resultados são dependentes da profundidade, extensão e ângulo de mergulho do corpo, além da direção do campo magnético da Terra. A equação 21 representa o ASA, onde  $A$  são os valores do campo magnético anômalo.

$$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial Y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2} \quad \text{Equação (21)}$$

### 3.4.2.7 Filtro Gradiente Horizontal Total – GHT

O filtro GHT é usado para o aprimoramento na detecção de bordas de corpos anômalos em dados de campo potencial (Cooper and Cowan, 2008). Quando o gradiente horizontal de uma anomalia é medido, avaliam-se as mudanças abruptas das propriedades físicas que variam lateralmente. Ao ser aplicado em dados magnetométricos, o GHT destaca mudanças abruptas entre contatos geológicos que variam lateralmente tanto de susceptibilidades magnética, quanto de diferentes densidades, onde os gradientes mais íngremes indicam tais mudanças. Segundo Ferreira *et al* (2013), o filtro realça as altas frequências e posiciona os picos das anomalias bem próximas das bordas dos corpos, com valores mínimos na parte central, diminuindo a força do sinal com o aumento da profundidade.

O cálculo da GHT é realizado pela equação 22, a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas das anomalias ( $A$ ) em cada direção ( $x$  e  $y$ ):

$$GHT = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2} \quad \text{Equação (22)}$$

### 3.4.2.8 Filtro Inclinação do Sinal Analítico – ISA

O ISA ou *Tilt Derivate* é eficaz no balanceamento de amplitudes de diferentes anomalias com valores restritos entre  $-\pi/2$  e  $+\pi/2$ . Segundo Verduzco *et al.* (2004), as vantagens deste método são a capacidade de normalizar imagens provenientes de dados de campo magnético e o fato de ter bons resultados na presença de ruído. As respostas deste filtro em dados magnetométricos reduzidos ao polo possuem seus picos exatamente sobre o centro do corpo, caindo para zero sobre as proximidades dos limites do corpo anômalo.

O método ISA normaliza a derivada vertical  $Dz$  pelo GHT, segundo Miller & Singh (1994), e utiliza a equação 23:

$$ISA = \tan^{-1} \left( \frac{Dz}{GHT} \right) \quad \text{Equação (23)}$$

#### 3.4.2.9 Filtro Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico - GHT\_ISA

O GHT\_ISA baseia-se na aplicação do GHT em dados já filtrados com o ISA. É reconhecido como um método eficaz para a definição de limites de corpos anômalos. Verduzco et al. (2004) introduziu o método com o objetivo de mapear estruturas rasas do embasamento, realçando e posicionando os picos de amplitudes nas bordas dos corpos causadores. O método é muito empregado para localização de corpos rasos, pois as amplitudes atenuam-se com o aumento da profundidade.

A equação 24 define o GHT\_ISA através da aplicação do GHT aos dados de ISA nas direções x e y:

$$GHT_{ISA} = \left[ \left( \frac{\partial ISA}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial ISA}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Equação (24)}$$

No qual:

$GHT_{ISA}$  – Gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico;

$\partial ISA$  – derivada da inclinação do sinal analítico;

$\partial x$  – derivada horizontal em x;

$\partial y$  – derivada horizontal em y.

#### 3.4.2.10 Filtro Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total - ISA\_GHT

Segundo Ferreira *et al* (2013) o ISA\_GHT é um método eficaz usado para a detecção de bordas de corpos anômalos, e o objetivo é realçar o gradiente horizontal total de anomalias utilizando a inclinação do sinal analítico. Produz

máxima amplitude da anomalia situada nas bordas do corpo. Uma de suas principais características é a de equalizar sinais provenientes de fontes rasas e profundas. Segundo o mesmo autor, o método não produz bons resultados quando o dado não está reduzido ao polo ou quando o corpo possui magnetização remanescente.

O ISA\_GHT é menos sensível à diferença de profundidade. Os corpos anômalos mais rasos possuem suas bordas igualmente realçadas por máximas amplitudes de sinal quando comparados a corpos anômalos mais profundos. A obtenção do ISA\_GHT se dá pela equação 25:

$$ISA_{GTH} = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial GHT}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial GHT}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial GHT}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad \text{Equação (25)}$$

No qual:

ISA<sub>GTH</sub> - Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total;

$\partial GHT$  – derivada do Gradiente Horizontal Total;

$\partial z$  – derivada vertical;

$\partial y$  – derivada horizontal em y;

$\partial x$  – derivada horizontal em x.

### 3.4.3 Modelamento Geofísico

Para o modelamento Geofísico em três dimensões da área de estudo, utilizou-se unicamente os dados magnetométricos coletados em campo. O modelo foi construído na plataforma OMG, com a ferramenta de inversão *Voxi Earth Modelling*. Segundo os Manuais da Geosoft, trata-se de uma ferramenta que reduz tempo e esforço na produção de modelos 3D utilizando técnicas de inversão geofísica. É um sistema totalmente integrado com o ambiente do trabalho, ou seja, é possível integrar os dados de geofísica com sondagens, geoquímica, entre outros dados para o refinamento do modelo. A teoria de

inversão trata do problema de se fazer inferências sobre sistemas físicos a partir de dados observados. Visto que quase todos os dados estão sujeitos a alguma incerteza, essas inferências são, portanto, estatísticas. Além disso, uma vez que apenas pode-se registrar um número finito de dados (ruidosos) e uma vez que sistemas físicos são geralmente não lineares, poderão existir vários modelos que se ajustarão aos dados. A filosofia do processo de inversão é, então, inferir os parâmetros do modelo que descreve o meio físico, cuja solução do problema direto propicie valores calculados os mais semelhantes possíveis dos dados observados. De maneira geral, a inversão geofísica deve produzir um modelo de subsuperfície terrestre que esteja de acordo com os dados do levantamento Geofísico, em tempo hábil e baixo custo. O modelo deve estar de acordo com os dados geológicos e outras informações de um projeto. Basicamente temos a ideia de que um campo magnético ou gravimétrico, quando aplicado ou agindo sobre certas propriedades físicas como susceptibilidade ou densidade gera uma resposta. Estas respostas são medidas de modo a determinar as propriedades físicas associadas para predizer o que seriam estas propriedades. Este é o chamado problema inverso.



## **4 Resultados**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a área de estudo através dos conjuntos de dados aéreos cedidos gentilmente pela CPRM, referentes ao Levantamento aéreo do ESRG (CPRM, 2010), cuja metodologia foi abordada anteriormente. Os resultados obtidos através dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos obtidos em campo, que são o foco deste trabalho. Ao final, com base nos dados de aerogeofísicos e de campo, foi construído um modelo geofísico em três dimensões para a região de estudo.

### **4.1 Gamaespectrometria**

A escolha da área de estudo foi escolhida, inicialmente, com base nos trabalhos anteriores de Rost (2006), Heinrichs (2010) e Garcia (2013), respectivamente. A imagem em escala 1:250000 (Figura 10), serviu em primeira análise para uma comparação com o mapa geológico da CPRM, Wildner (2006), de modo a definir as grandes estruturas geológicas. Posteriormente, foi feita a análise mais detalhada na região da Mina Galena, para análise pré-campo dos resultados obtidos através dos mapas aerogeofísicos da CPRM (2010). Os resultados são apresentados abaixo e serviram para mostrar a necessidade de adensar a malha de pontos de amostragem na área de estudo, ou seja, era necessária uma maior resolução e detalhamento.

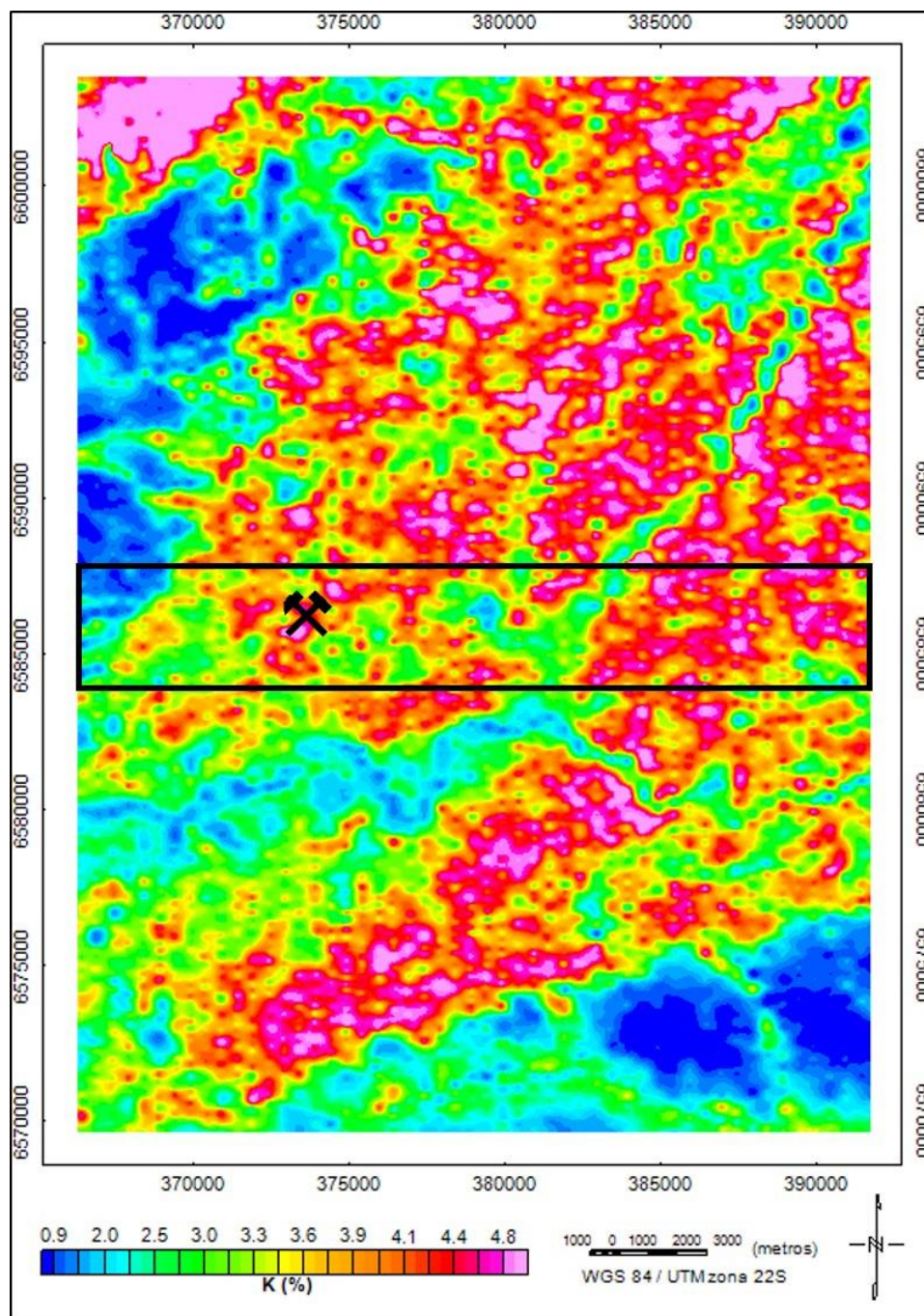


Figura 10: Canal do Potássio (%) da região de estudo. O polígono preto representa a região para o reprocessamento dos dados aerogeofísicos. Os martelos indicam o local da Mina Galena. Escala 1:250000.

O mapa do canal Potássio (K%), Figura 10, mostra boa compatibilidade entre os grandes corpos geológicos com exceção ao Complexo Granítico Gnaissico Pinheiro Machado que não apresenta contraste com os demais corpos

graníticos da Suíte Dom Feliciano. Esta falta de clareza revela uma composição semelhante, não no que se refere a origem e evolução de magmas, mas quanto a composição mineralógica, uma vez que o complexo é descrito como porfirítico Rost (2006) e possui feldspato potássico entre seus constituintes. Dessa forma, foi selecionada uma faixa na área para seção, de maneira que fossem percebidas lateralmente as mudanças composicionais, baseados nas percentagens de K (%), conforme mostra a Figura 11.

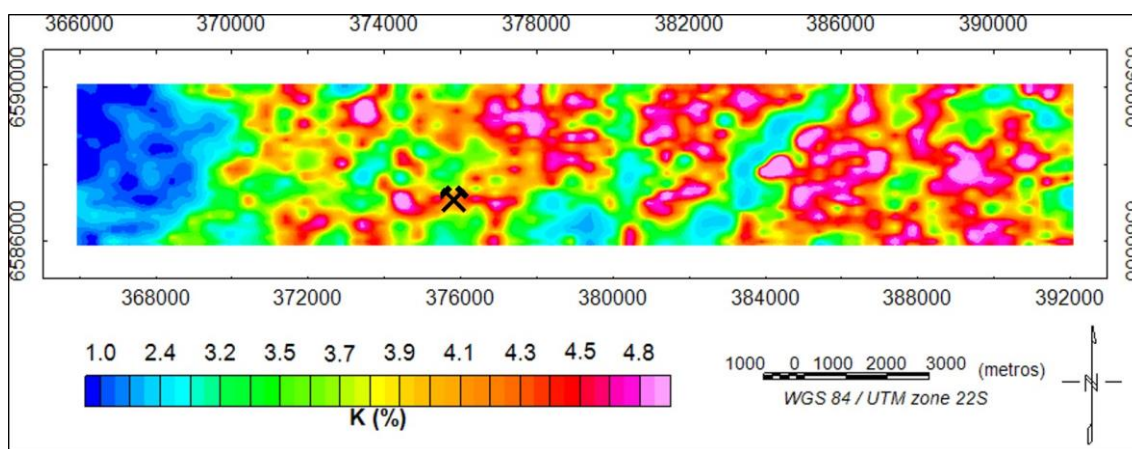


Figura 11: Seção aerogamaespectrométrica mostrando a mudança na percentagem de Potássio na região da Mina Galena. O polígono representa a área para cobertura terrestre detalhada na Figura 1.

Devido a escala (1:250000) de amostragem dos levantamentos aerogeofísicos da CPRM (2010), foi diagnosticada a necessidade de uma melhor resolução de pontos de amostragem na área, com o intuito de detectar corpos menores em detalhe. Assim, foi realizado o levantamento gamaespectrométrico terrestre nas proximidades da antiga exploração de chumbo na Mina Galena. A realização deste levantamento nas proximidades da antiga cava se deu, principalmente, pelo fato de que novos alvos prospectivos ocorrem em regiões próximas de antigos alvos mineralizados conhecidos, e podem servir de análogos (Hedenquist, 2000). O mapa com os pontos do levantamento e a antiga cava da mina está representado na Figura 12.

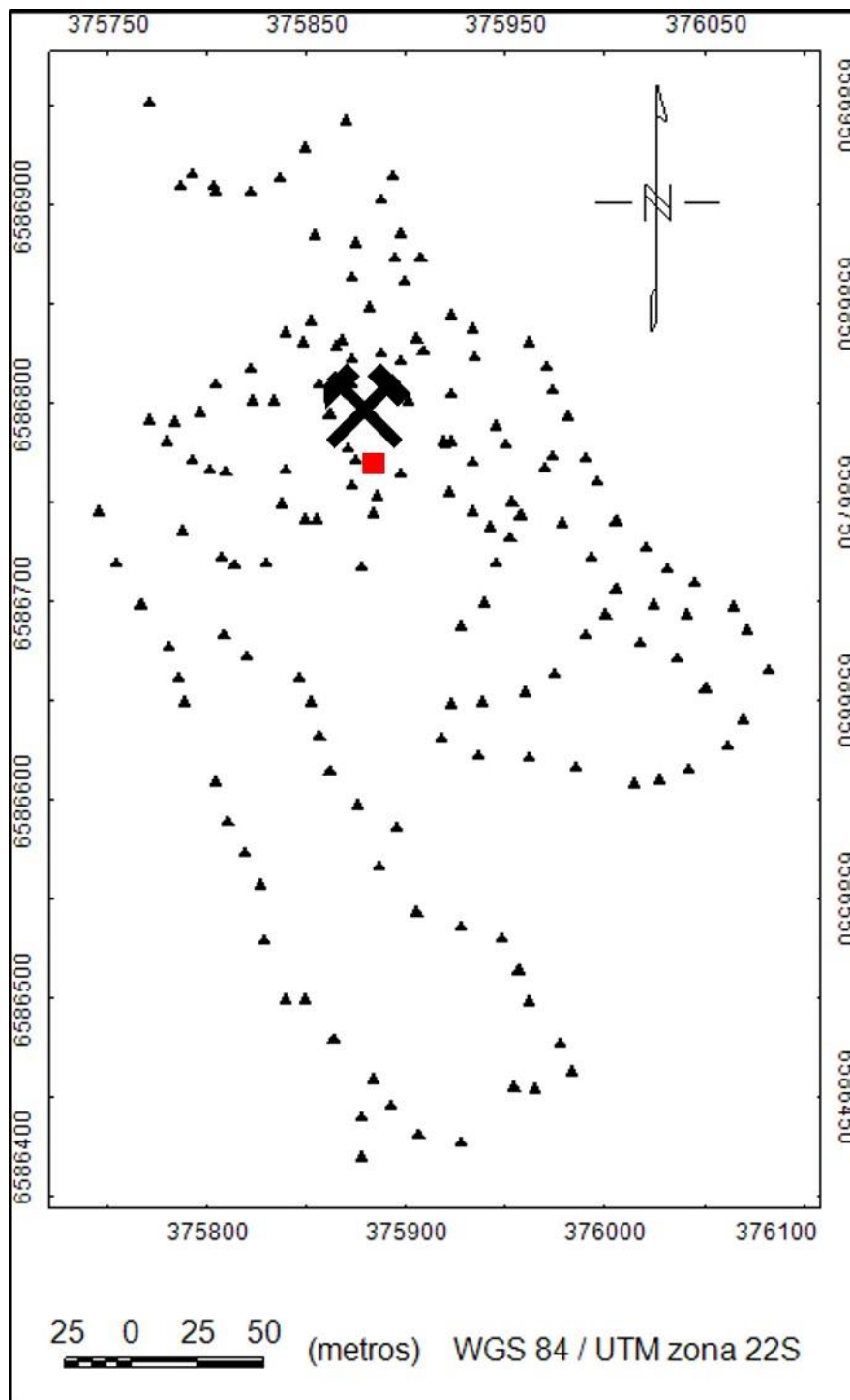


Figura 12: Mapa com os 155 pontos do levantamento terrestre e a localização da antiga cava da Mina Galena. Os martelos indicam a localização da Mina Galena e o quadrado vermelho a posição do magnetômetro base.

Para a coleta dos dados, foram evitadas regiões de drenagens e pontos alagadiços, que podem ter remobilização dos elementos. Os produtos gerados pela gamaespectrometria foram CT (contagem total, ppm), K (Potássio, %), eTh (equivalente de Tório, ppm), eU (equivalente de Urânio, ppm), Th/K, U/K, U/Th, Fator F e ternário com composição RGB. Conforme foi abordado no capítulo 3.4.1.2 as composições coloridas RGB e CMY são geradas a partir da contagem dos elementos K, eTh e eU. São de grande importância visual na identificação de domínios composicionais, e posterior correlação com domínios traçados na gamaespectrometria e magnetometria. Para este trabalho foi escolhida a composição RGB, pois apresentou melhor contraste. A Figura 13, mostra a composição colorida RGB para a área de estudo.

Com base no padrão de cores RGB (Figura 13), foi possível dividir a área de estudo em três domínios radiométricos: A, B1, B2 e C. Aqui novamente ressaltamos que o ideal para este levantamento seria conhecer a geologia da área em detalhe, porém, como já explicado em capítulos anteriores, não existe ou não está disponível o mapa geológico com a escala deste trabalho, mas apenas o mapa de Rost (2006), em escala 1:25000, e descrições em trabalhos anteriores de Heinrichs (2010), onde foram delimitadas quatro fácies petrográficas, mas sem estabelecer sua posição geográfica. Deste modo, os domínios foram definidos com base nos resultados radiométricos.

Domínio radiométrico A: trata-se da região com melhor exposição de rochas e é o local da área estudada onde encontra-se a antiga cava da mina. Possui valores de intermediários a altos de K, variando de 2.8 a 4.4 %. O eU mostra valores baixos a intermediários de até 2 ppm, e aumentando ao norte e na região da mina, chegando a 6 ppm. O eTh mostra valores baixos a intermediários variando de 7 a 13.2 ppm e chegando a valores mais elevados ao norte onde a topografia é mais elevada, registrando 25 ppm.

Domínio radiométrico B: este domínio foi dividido em B1 e B2 por estarem em regiões geograficamente separadas, porém com resposta radiométrica semelhante. O domínio B1 está localizado na região centro sul, e compreende a parte central do domínio A com o limite do domínio C. O destaque são os valores de eU. O domínio B2 compreende toda a porção leste da área de norte a sul e está marcado por valores altos de eU a intermediários de eU e eTh.



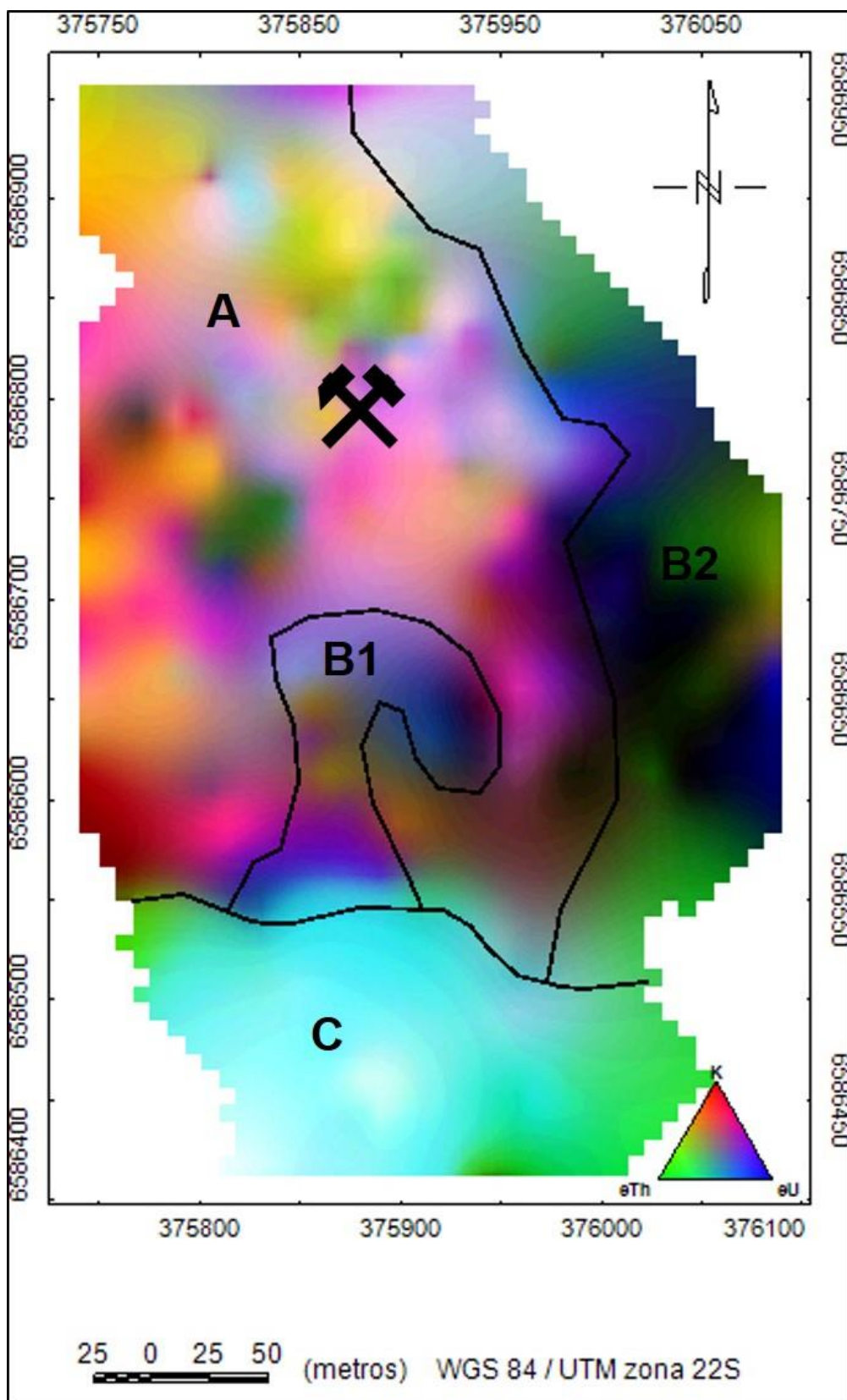


Figura 13: Composição RGB para a área de estudo, com a divisão em três domínios radiométricos.

Domínio radiométrico C: este domínio está localizado no extremo sul da região, em local com aumento topográfico e visível mudança litológica. A principal característica deste domínio é o aumento da concentração de eU e principalmente de eTh. O contraste é visível também na contagem total dos elementos, que aqui registrou o máximo de 439.1 ppm, enquanto nas demais áreas, o máximo foi de 178.3, ou seja, trata-se de região completamente distinta das demais sob o ponto de vista radiométrico.

A Figura 14 mostra os mapas radiométricos de CT, K, eTh e eU. Nota-se que no mapa de contagem total uma distribuição bem clara dos elementos e que coincide com a separação dos domínios RGB. Os valores mais altos ao Sul chegando a 439.1 ppm, e de intermediários a altos no centro norte, variando de 121.4 a 153.8 ppm. Enquanto isso, a leste ocorre uma depressão com valores de 52.4 a 79.5 ppm, e, ainda na região central, uma zona intermediária variando de 94 a 111.9 ppm. Os quatro mapas apresentam uma boa correlação para a separação dos domínios. Os principais destaques são os valores altos do K ao centro e norte da área, e os altos valores de eU e principalmente de eTh ao sul. O canal eU apresenta outros dois pontos relativamente elevados, um ao centro nas proximidades da mina e outro ponto ao norte.

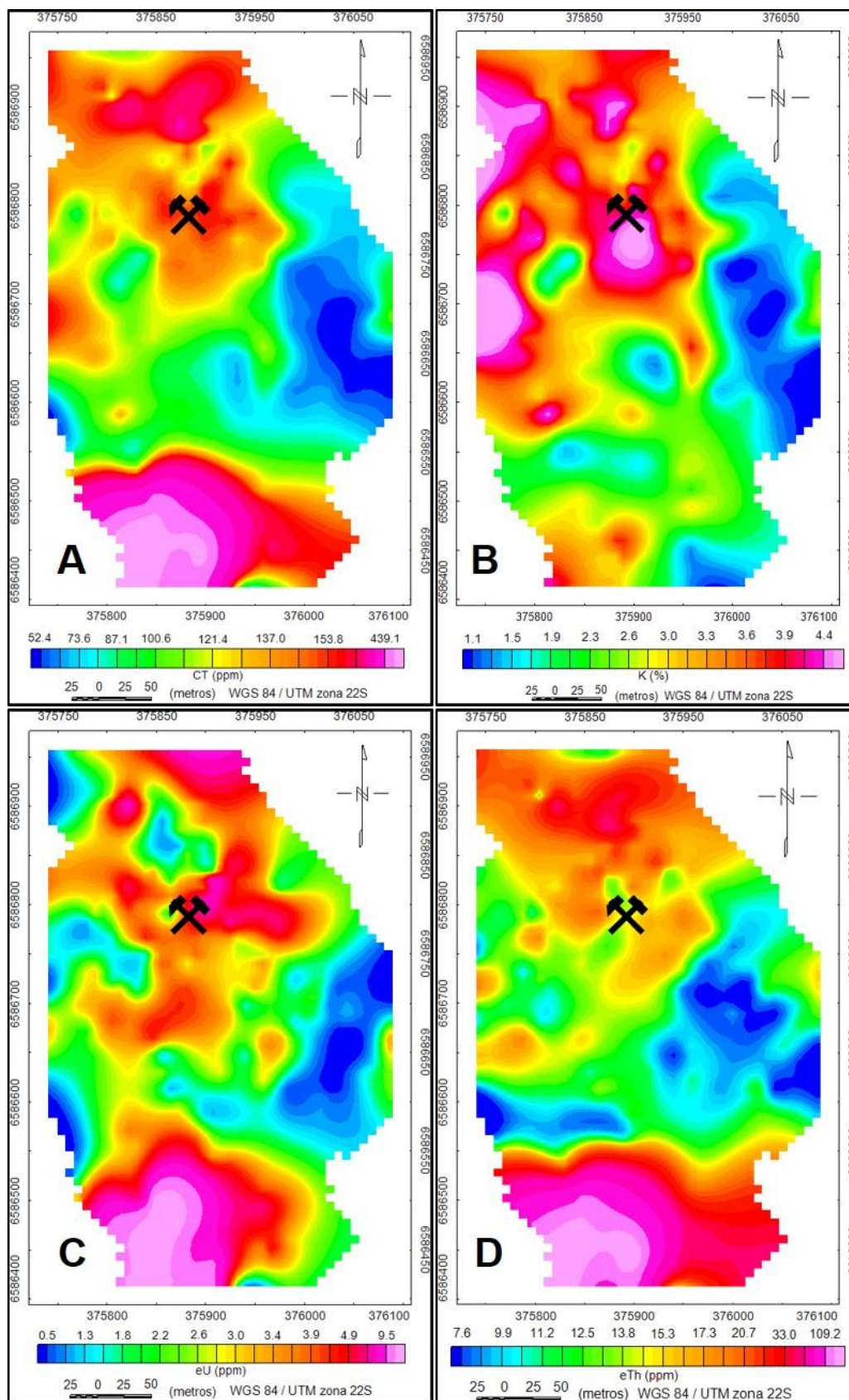


Figura 14: Mapas radiométricos. A - Contagem Total (CT); B - Potássio (K); C - Urânio (eU); D - Tório (eTh).



O canal eTh também apresenta no Norte um aumento nos valores em relação a região central. Outro destaque é o fato de os três elementos mostrarem baixas concentrações na região leste.

A Figura 15 ilustra os mapas de razões Th/K, U/K e U/Th. Segundo Biondo (2013), estes elementos possuem diferentes comportamentos geoquímicos. Pode-se inferir a partir disto, que estas razões apresentam, em primeira análise, a mobilidade superficial destes elementos, uma vez que o método radiométrico atua principalmente em superfície. Ainda segundo a mesma autora, são boas razões para analisar o grau de diferenciação em rochas granitoides, bem como de alteração hidrotermal. A razão Th/K mostra os valores mais elevados na região sul, onde chega a 36.3 ppm e os menores a oeste com 2 ppm. A razão U/K também apresenta os maiores valores ao sul atingindo 3.3 ppm, e outro ponto elevado a nordeste alcançando 2 ppm. Seus valores baixos estão distribuídos a oeste, a leste e uma porção a norte chegando a 0.2 ppm. Já a razão U/Th, apresenta concentração mais elevada na porção central e na borda norte, com valores de até 0.3 ppm. Seus valores mais baixos margeiam a região central com valores de aproximadamente 0–0.1 ppm.

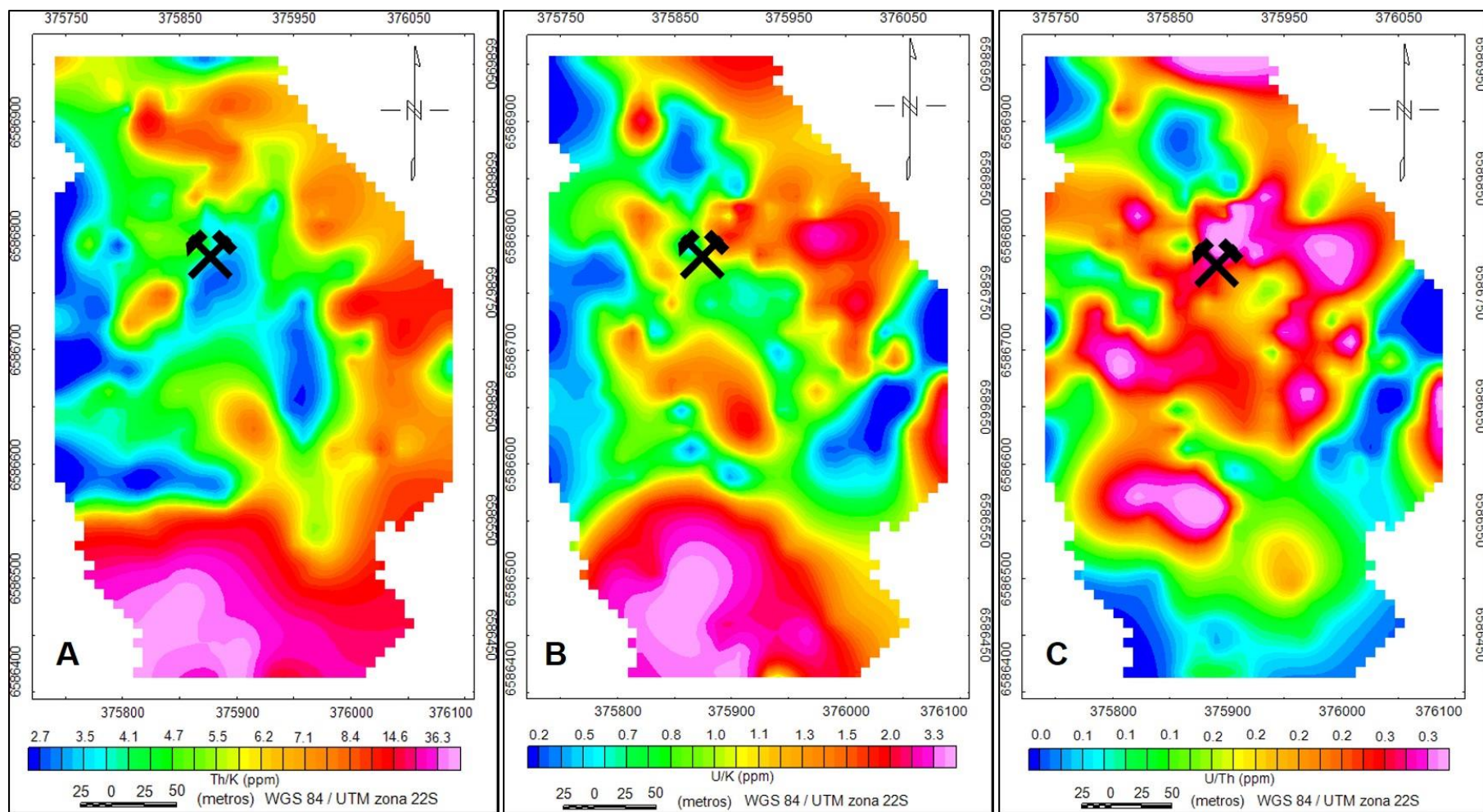


Figura 15: Razões radiométricas. A - Th/K. B - U/K. C - U/Th.

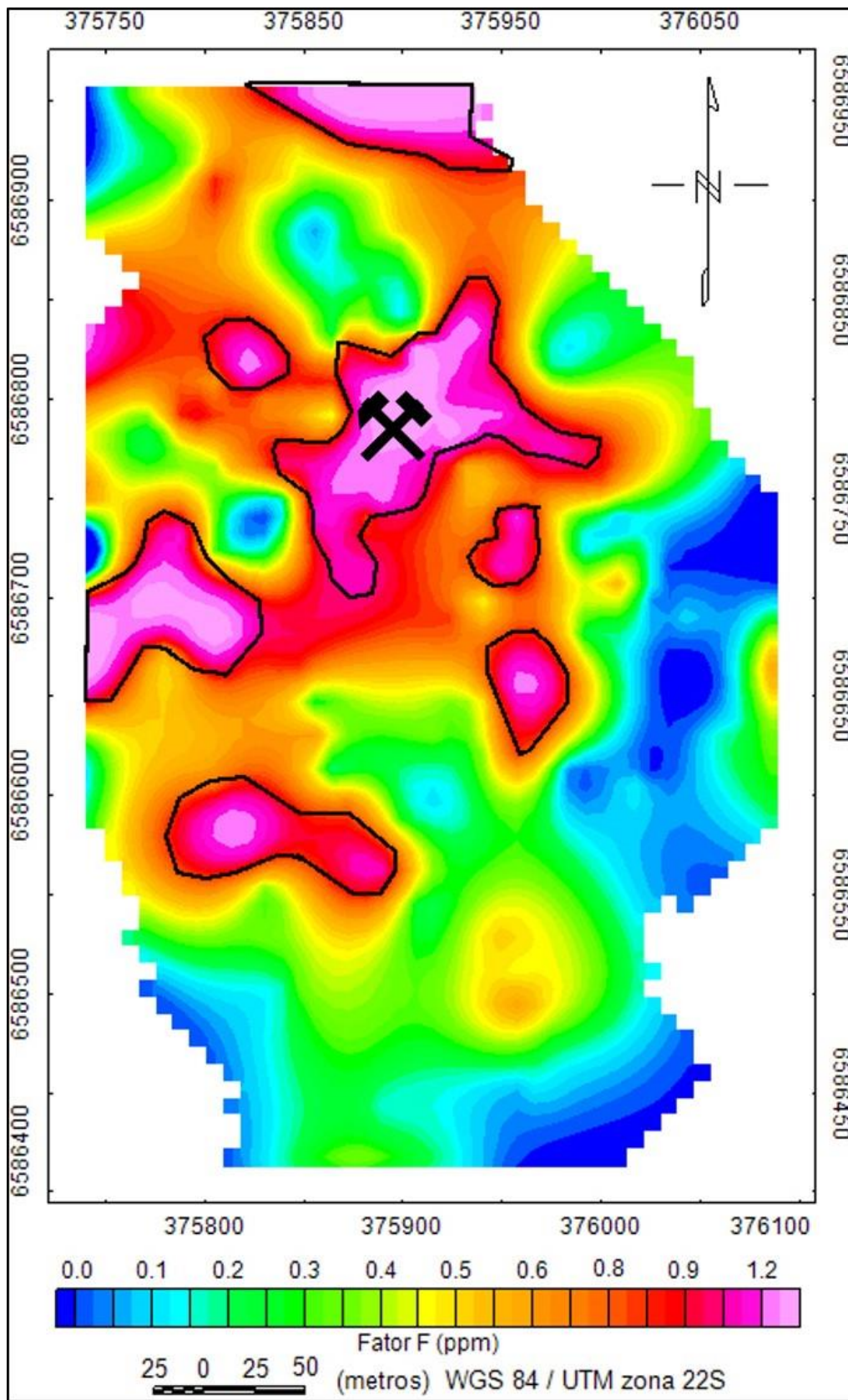


Figura 16: Mapa do Fator  $F$ . Os contornos delimitados pela linha preta realçam os principais domínios hidrotermais.

A Figura 16 mostra o parâmetro Fator  $F$  para a região. Como dito no capítulo 3.4.1.1, o Fator  $F$  é uma excelente ferramenta para a determinação da ação hidrotermal na região. O mapa do Fator  $F$  apresentou os focos principais com valores mais elevados ao centro e ao norte da área de estudo. Estes focos variam de 1 a 1.2 ppm, enquanto as regiões com baixos valores possuem valores de 0.1 ppm.

A Tabela 14 mostra um resumo dos valores obtidos na região com o método radiométrico.

Tabela 14: Resumo dos valores radiométricos para a área do estudo.

<b>Elementos</b>	<b>Mínimos</b>	<b>Máximos</b>
K (%)	1.1	4.4
eU (ppm)	0.5	9.5
eTh (ppm)	7.6	109.2
CT (ppm)	52.4	439.1
Th/K (ppm)	2.7	33.6
U/K (ppm)	0.2	3.3
U/Th (ppm)	0	0.3
Fator $F$ (ppm)	0	1.2

## 4.2 Magnetometria

A área selecionada para o levantamento magnetométrico foi a mesma descrita anteriormente no método radiométrico (Figura 17). O mapa aeromagnético da região mostra intensa magnetização em feições NE-SW, o que coincide com as grandes estruturas da SGDF. As estruturas são observadas na coloração magenta quando a magnetização é intensa, e coloração verde, quando a magnetização intermediária. Comparando com o mapa geológico da CPRM (Wildner,1997), a região da SGDF, está dividida em fácies Serra do Herval e Fácies Cerro Grande. Ocorre também o Complexo Granítico Gnáissico Pinheiro Machado (CGGPM). Fica bastante difícil diferenciar estas rochas,

mostrando certa similaridade magnética, principalmente a fácies Serra do Herval e O CGGPM. A fácies Cerro Grande parece apresentar magnetização intermediária. Mais ao sul, o baixo magnético distingue os depósitos eluviais e coluviais.

A partir deste mapa foi gerada uma seção para adensamento em região que compreende também a área da mina. A seção procurou capturar as variações magnéticas laterais.



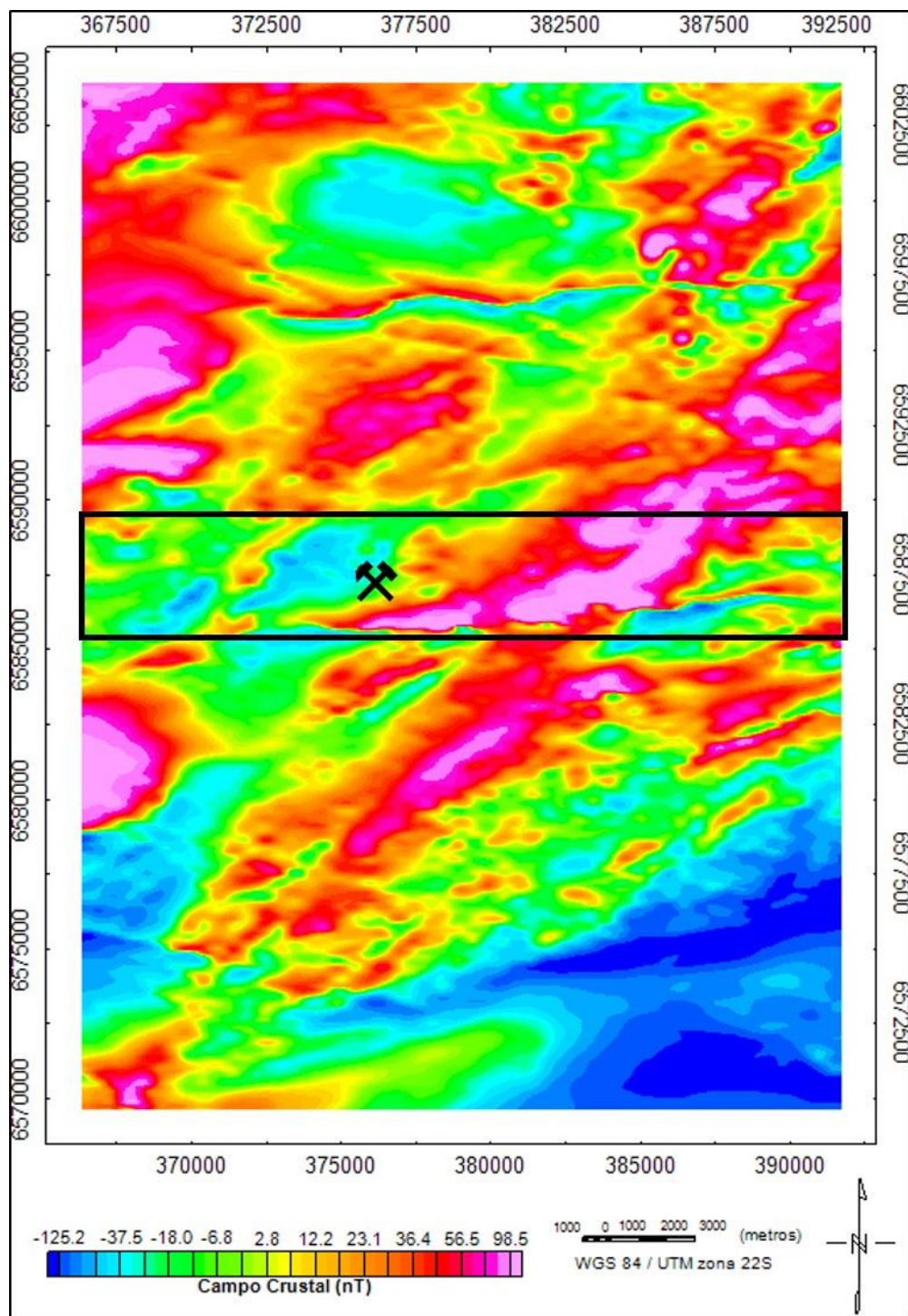


Figura 17: Mapa aeromagnético de campo total (nT) reduzido do IGRF. O polígono preto (sem escala) representa a área para adensamento.

A Figura 18 mostra a seção que conseguiu representar as litologias da região, porém não foi possível obter uma boa resolução na área da Mina Galena,

uma vez que novamente foi percebida a necessidade de levantamento terrestre, o qual foi realizado como já discutido, juntamente com os dados gamaespectrométricos.

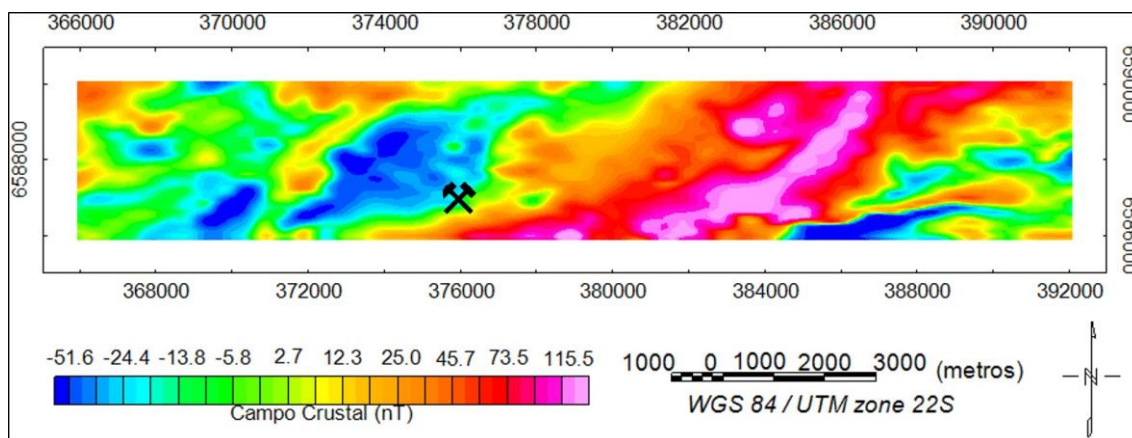


Figura 18: Seção aeromagnetométrica com mapa da CT (nT) reduzido do IGRF. O polígono representa a área para cobertura terrestre. Os martelos representam a região da mina.

Os dados de campo foram processados no *software* OMG e os resultados apresentados em um mapa de Campo Total em nanotesla (Figura 19A). A partir da leitura do manual de utilização do *software* disponibilizado pela Geosoft, Withehead (2010), percebeu-se que não existe apenas um procedimento para a utilização dos filtros. Ou seja, estes filtros são expressões matemáticas aplicados nos dados brutos ou sobre outros filtros, que realçam determinadas características de uma determinada região. Portanto, para este trabalho utilizou-se como base o mapa de Campo Total reduzido ao polo, pois como explicado no Capítulo 3.4.2.3, o RTP suaviza os efeitos do Campo Total, desloca o máximo da anomalia, fazendo com que se localize exatamente em cima do corpo causador (Figura 19B). Com base nos resultados, foi possível separar a região em quatro domínios magnéticos que variam de baixos, ao norte, a elevados, ao sul, nomeados de A a D, de acordo com a intensidade do campo, com valores entre 22405 e 22572 nT.

Domínio magnético A – localizado na porção norte, representa os baixos magnéticos com valores de 22405 a 22422 nT. Esta região está a norte da mina, onde ocorre aumento da topografia.

Domínio magnético B – de magnetização baixa a intermediária com valores de 22490 a 22518 nT. Nesta região está localizada a cava da mina e aparentemente apenas com os dados de campo total não é possível obter uma resposta satisfatória.

Domínio magnético C – magnetização intermediária a alta, com valores entre 22529 a 22533 nT. Representa a saída a sul da cava, em região de depressão topográfica.

Domínio magnético D – porção ao extremo sul da área, com os maiores valores magnéticos variando de 22560 a 22572 nT. Nesta região ocorre a entrada do granitoide Cerro Grande, cuja resposta magnética aumenta consideravelmente.



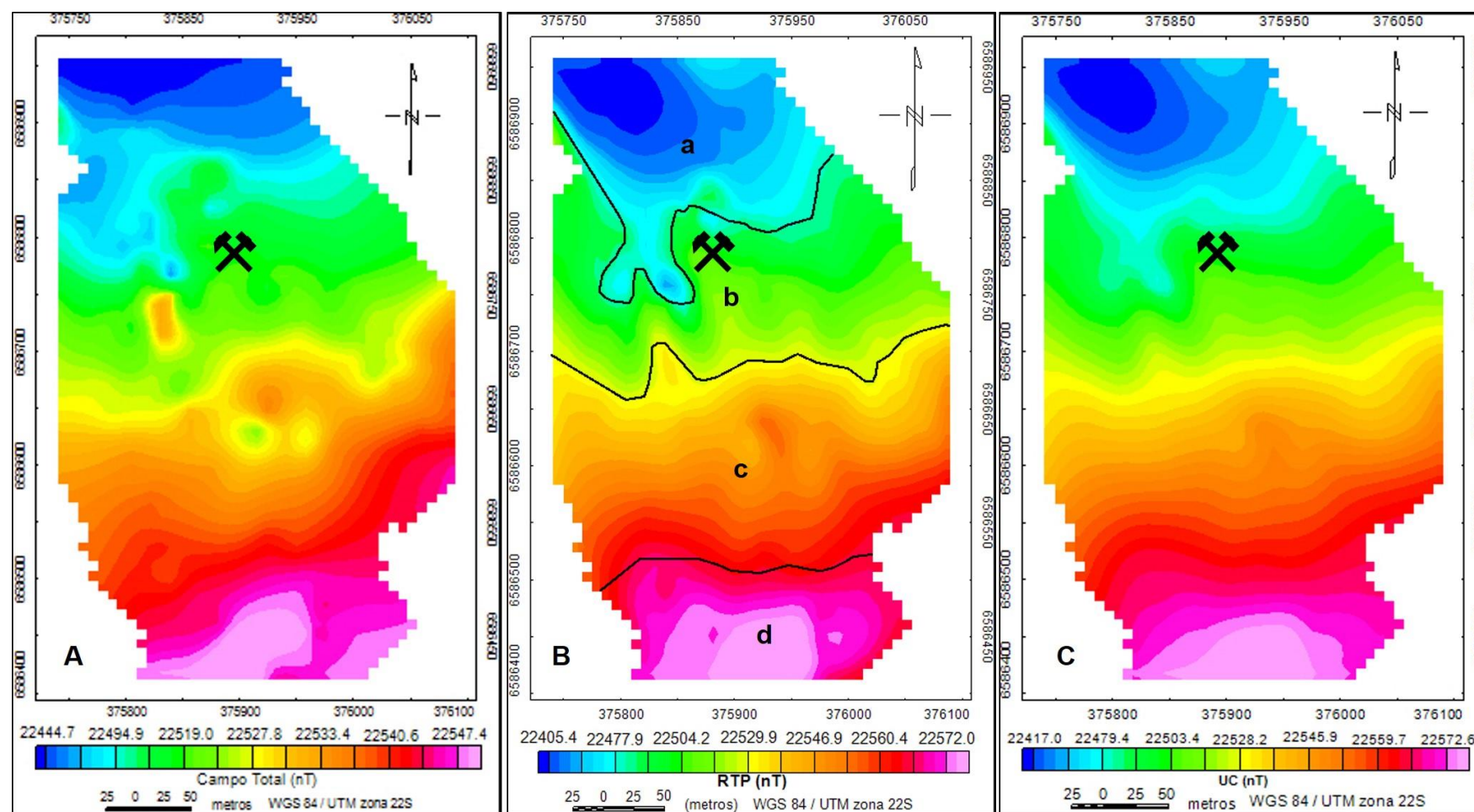


Figura 19: Mapas magnéticos da região. A - Campo Anômalo Total; B - Redução ao Polo; C - Continuação para cima.

O mapa de continuação para cima UC (Figura 19C), a partir dos dados reduzidos ao polo RTP, suaviza as feições do RTP, uma vez que o plano de observação se eleva, e para este caso, foi continuado para cima em 10 metros. Os ruídos rasos são atenuados. Os valores magnéticos não foram alterados, apenas as curvas de intensidade de magnetização, o que será discutido na integração dos dados.

A partir da análise do comprimento de onda, é possível construir o gráfico do espectro de potência radial, (Figura 20). Conforme podemos observar, para a região de estudo, foram encontradas fontes magnéticas de aproximadamente 65 metros e 35 metros. O gráfico de comprimentos de onda foi dividido em fontes profundas, rasas e ruídos. De modo geral, são construídas três retas que interceptam as ondas, e onde o ângulo muda, sendo necessário construir uma nova reta, é a divisão de comprimentos de onda.

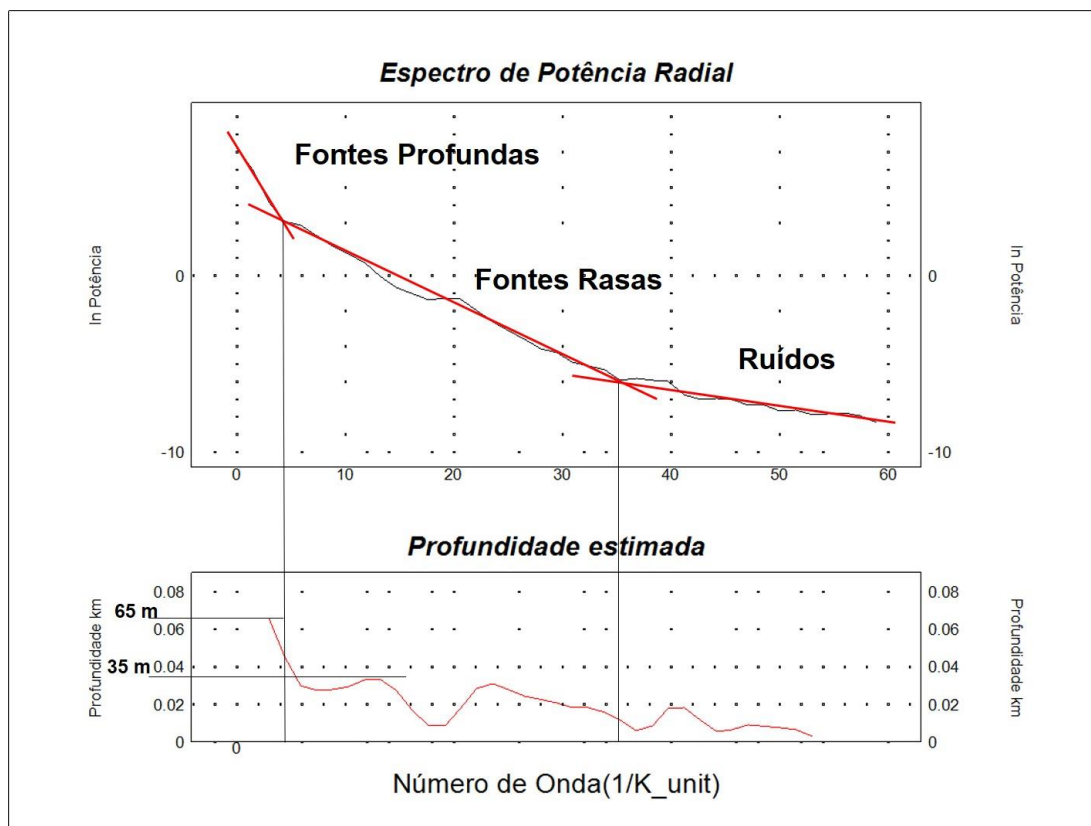


Figura 20: Espectro de potência radial mostrando intensidades magnéticas com 35 e 65 metros.

A partir do mapa de RTP foram gerados os demais filtros, cada qual com o seu objetivo, característica e limitação, um complementando o outro no processo de interpretação. As Figuras 21, 22 e 23 mostram o conjunto de derivadas construídas para o estudo. De modo geral, o filtro de derivada horizontal ou vertical, é utilizado na primeira ordem na grande maioria dos trabalhos. Neste trabalho serão utilizados os resultados das derivadas 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e de ordem 0,5, onde, posteriormente, em capítulo específico serão discutidos estes resultados.

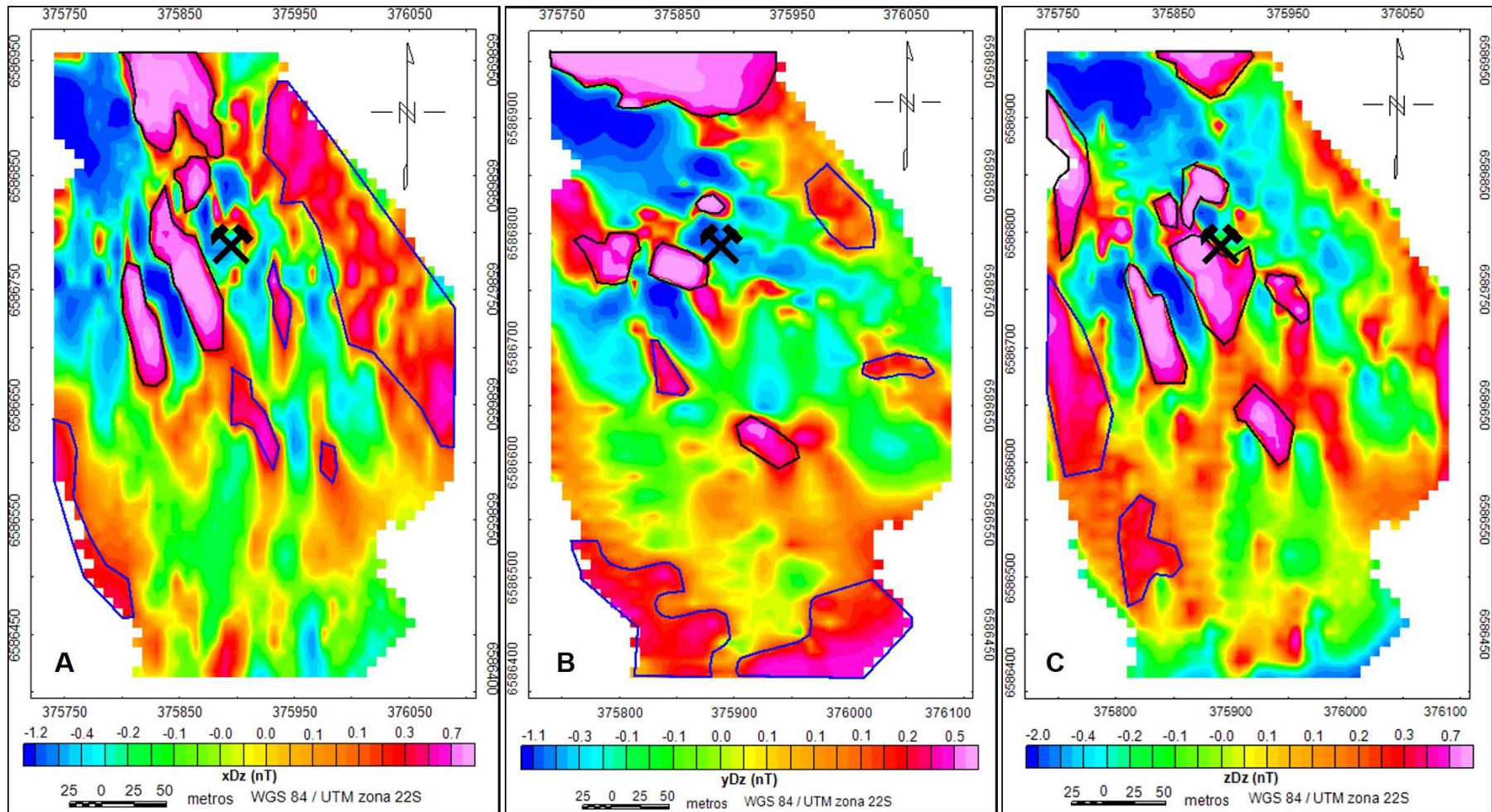


Figura 21: Mapas da Primeira derivada com realce de intensidade. Os polígonos pretos são de alta intensidade, e os azuis de média a alta. A - Derivada Horizontal em X. B - Derivada Horizontal em Y. C - Derivada Vertical em Z.



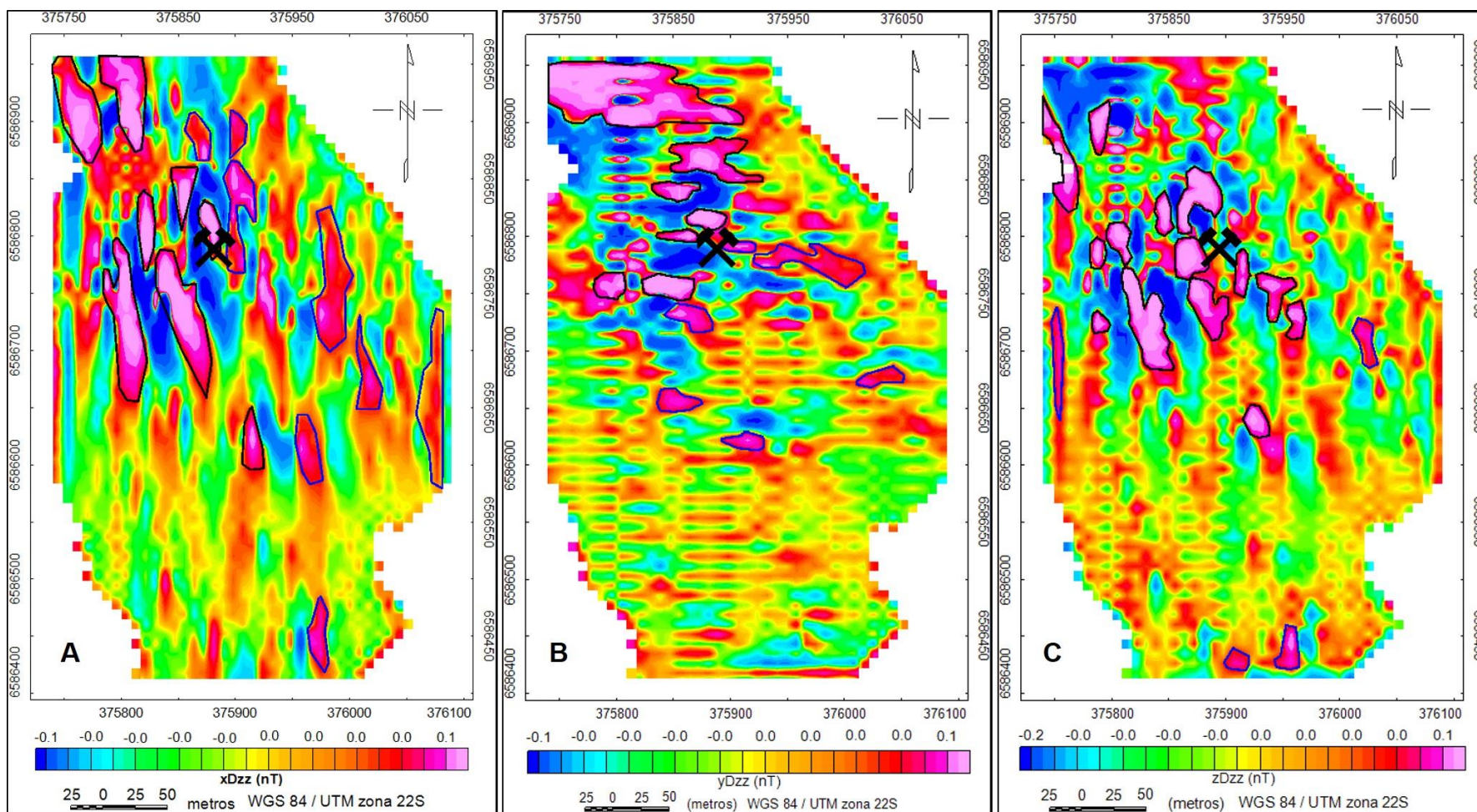


Figura 22: Mapas da Segunda derivada com realce de intensidade. Os polígonos pretos são de alta intensidade, e os azuis de média a alta. A - Derivada Horizontal em X. B - Derivada Horizontal em Y. C - Derivada Vertical em Z.

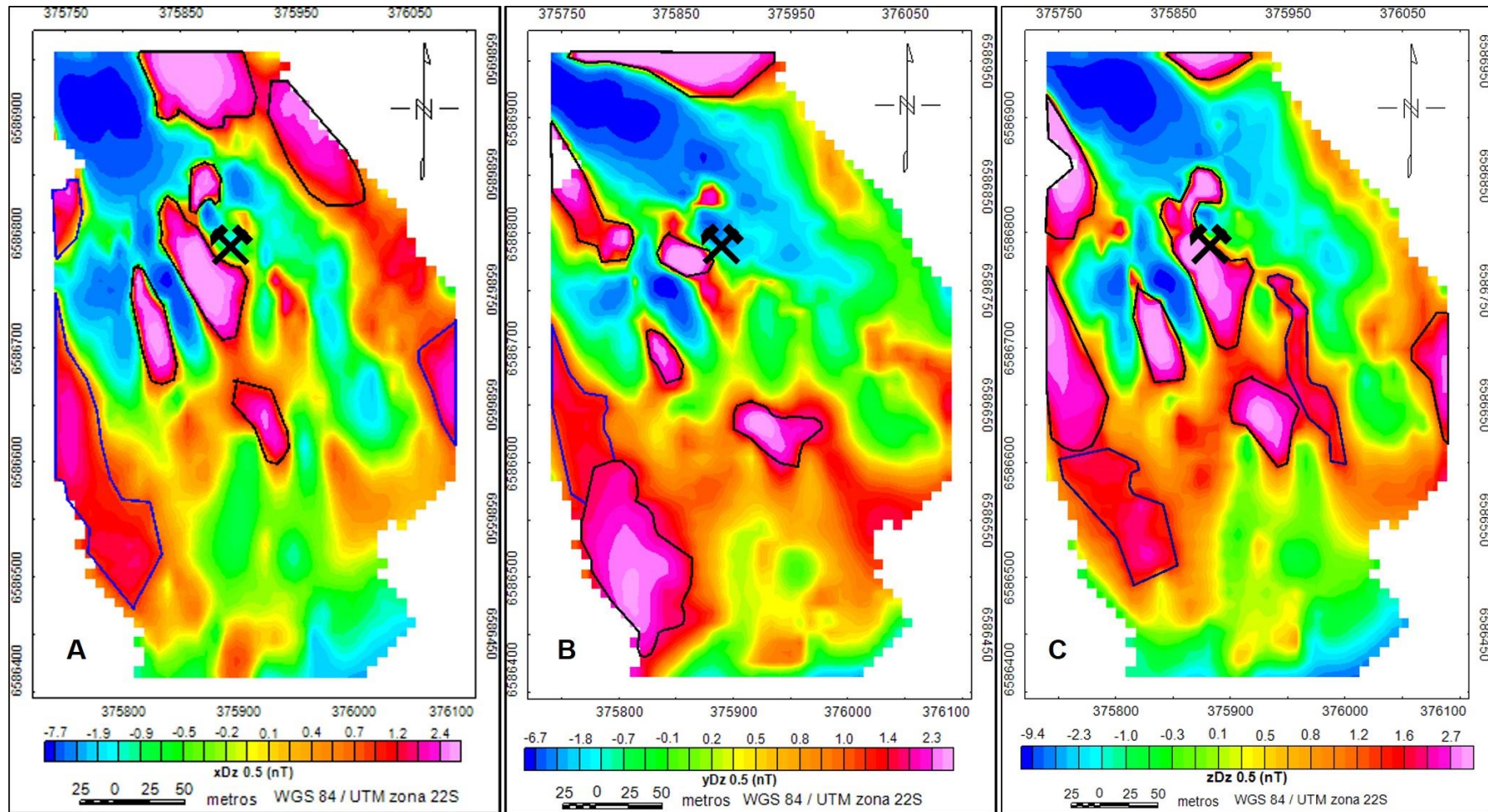


Figura 23: Mapas da derivada de ordem 0,5 com realce de intensidade. Os polígonos pretos são de alta intensidade, e os azuis de média a alta. A - Derivada Horizontal em X. B – Derivada Horizontal em Y. C – Derivada Vertical em Z.

Como se pode observar, existe um aumento no ruído entre a primeira e a segunda derivada, o que foi atenuado com a derivada de ordem 0,5. Analisando os resultados da primeira derivada, a variação horizontal em x, (Figura 21A), mostra valores altos na região centro norte da área, com dois focos mais centrais e um maior ao norte, todos com orientação aproximadamente NNW. Um *trend* com mesma orientação, mas com menor intensidade de magnetização ocorre a NE e outro mais fraco ainda a SW. A variação em Y, (Figura 21B), mostra dois focos com grande intensidade na região centro norte de orientação WNW. Existem outros três focos menores para o centro sul que não ocorreram em X, assim como em Y, não ocorreram os mais baixos de x em SW e NE. A derivada vertical (Figura 21C), mostra ao menos cinco focos intensos de magnetização: três centrais, um grande na borda W e um na borda N. Na extremidade E, ocorre um valor médio a alto que foi desconsiderado por ser considerado anomalia de borda, ou seja, poucos ou nenhum ponto coletado.

A segunda derivada apresenta muitos ruídos, que ficam evidentes nas componentes horizontais, onde percebe-se um alongamento das anomalias. De modo geral, espera-se que as anomalias sejam correspondidas entre as derivadas. Isso não ocorre, pois, a área de estudo apresenta fontes anômalas rasas e a segunda derivada realça os ruídos. Isso pode ser visto, por exemplo, na Figura 22A, da componente horizontal X, onde os focos anômalos principais são com orientação igual a primeira derivada. Porém, um dos focos se estende até o Norte como se fosse uma fonte anômala. A borda leste também mostra inúmeras anomalias de médio porte com orientação aproximadamente N-S. A componente Y (Figura 22) realça três focos na porção norte semelhantes com a primeira derivada, mas mais intensos. Na porção centro sul ocorrem valores baixos a médios, com orientação aproximadamente L-W. A segunda derivada vertical (Figura 22C) mostra valores semelhantes com a primeira derivada vertical, diminuindo os valores da borda W, acrescentando uma anomalia no centro, valores mais elevados a Sul.

A derivada de ordem 0,5, a princípio consegue atenuar os ruídos e identificar mais claramente as fontes das anomalias magnéticas. A componente X (Figura 23A) separa completamente as fontes anômalas centrais da fonte ao Norte. Além disso, a região central ganha mais um foco, juntamente com o



aumento das anomalias nas bordas NE e SW. A componente Y (Figura 23B) acrescenta duas fontes anômalas na porção central, e uma de grande intensidade na borda SW. As demais se mantiveram em relação a primeira derivada. A derivada vertical (Figura 23C), de modo geral, ficou extremamente semelhante com a primeira derivada vertical.

Também existem outros filtros de identificação de bordas e centros dos corpos anômalos. O interessante durante a averiguação de uma anomalia utilizando-se métodos indiretos de pesquisa é justamente a integração destes dados para melhorar a resposta. A seguir serão apresentados os dados de Amplitude do Sinal Analítico, Gradiente Horizontal Total, Inclinação do Sinal Analítico, além de uma combinação dos mesmos.

O ASA (Figura 24A), apresenta os valores mais elevados na região central e ao norte com valores de 1 a 1.9 nT/m. A intensidade intermediária a baixa está representada na metade da região para o sul com valores que variam de 0.3 a 0.1 nT/m.

A ISA mostrou um padrão relativamente disperso de fontes anômalas como podemos observar na Figura 24B, a qual podemos visualizar pelo menos quatro feições centrais, e uma grande feição na borda oeste que se estende até o Sul, na qual todas estas, tem orientação NW–SE. Existe ainda uma feição ao sul com orientação E–W, e outra no extremo norte com feição arredondada.

O filtro GHT (Figura 24C) é uma espécie de complementação do ASA, pois as respostas são semelhantes. O GHT mostrou valores mais intensos no centro para o Norte e noroeste como o ASA, e, valores de 0.5 a 0.9 nT/m. Basicamente são dois grandes focos: um central com dois picos praticamente juntos, e um maior em NNW. A região sul com menor magnetização apresenta valores variando em torno de 0.1 a 0.3 nT/m.



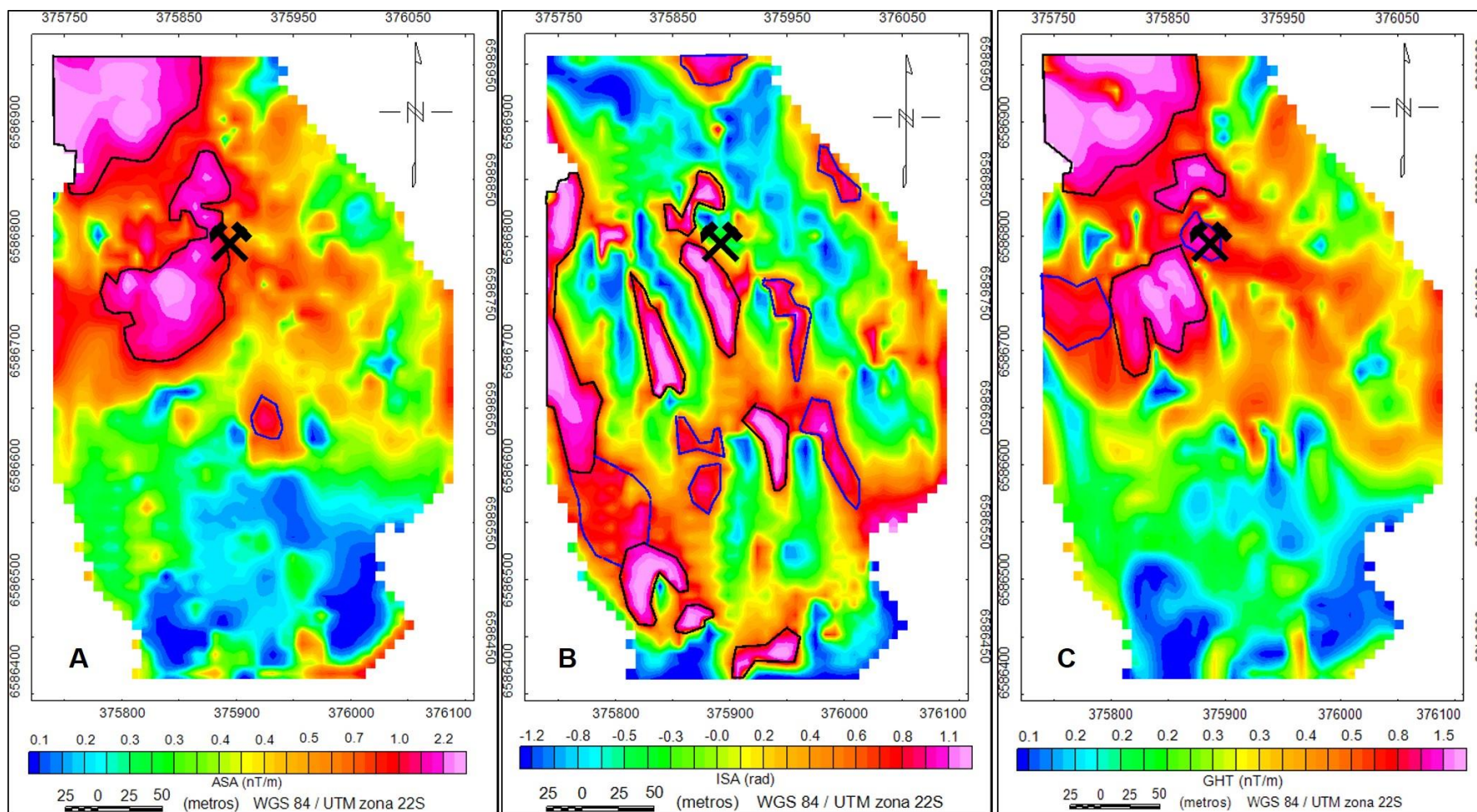


Figura 24: Mapas de intensidade de respectivamente: A - Amplitude do Sinal Analítico. B - Inclinação do Sinal Analítico. C - Gradiente Horizontal Total. Os polígonos pretos são de alta intensidade, e os azuis de média a alta.

Foram utilizados ainda uma combinação dos filtros de Inclinação do Sinal Analítico e Gradiente Horizontal Total formando os mapas do Gradiente horizontal Total com inclinação do Sinal Analítico (GHT\_ISA) e a Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA\_GHT).

O GHT\_ISA (Figura 25A) mostra feições anômalas no centro da imagem como destacado pelas elipses, com valores de até 0.1 rad/m ocorrem também porções anômalas ao sul da imagem nas proximidades do Cerro Grande e outros dois focos menores a leste e ao norte.

O mapa ISA\_GHT (Figura 25B), apresenta valores intensos mais dispersos, o que pode ser considerado normal, visto que este filtro realça limites ou forma dos corpos anômalos. Os valores mais altos atingiram de 1 a 1.3 rad, podendo distinguir três regiões: norte, bem delimitada, a região central, com limites difusos, e a região sul, de duas a três delimitações. Os baixos magnéticos alcançaram valores de -0.4 a -0.8 rad.

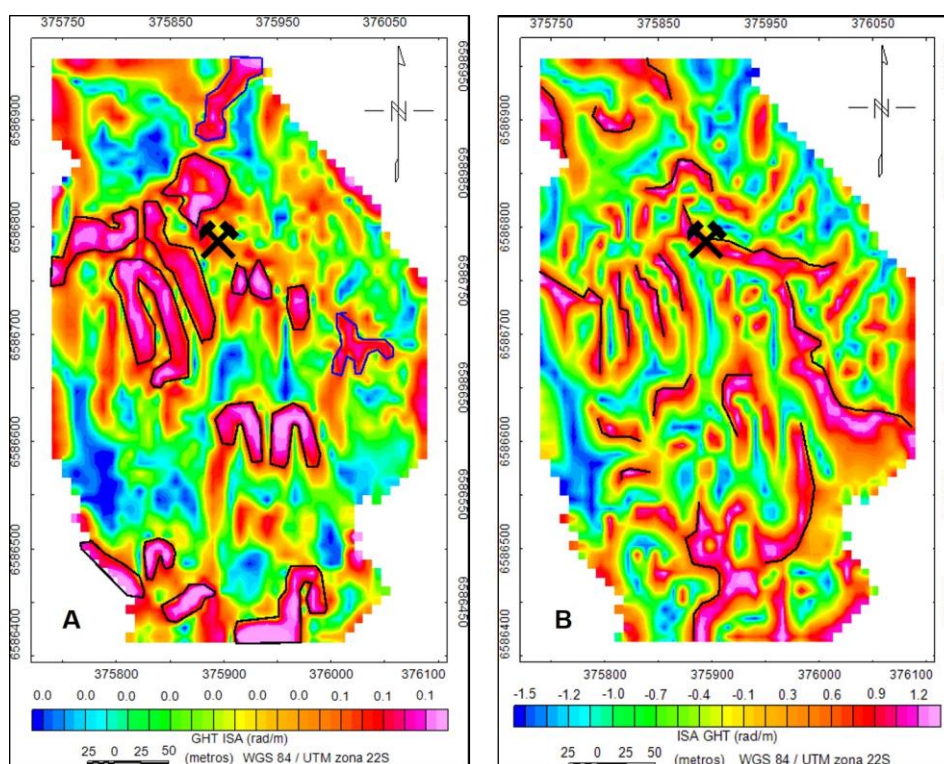


Figura 25: Mapas de intensidade respectivamente do: A - Gradiente Horizontal Total do Sinal Analítico. B - Inclinação do Sinal Analítico com Gradiente Horizontal Total.

### 4.3 Modelo Geofísico em três dimensões

O modelo aqui proposto levou em consideração somente os dados magnéticos obtidos em campo, os quais passaram por uma rotina computacional na extensão *Voxy*, dentro da plataforma *OMG*. A primeira imagem (Figura 26) mostra o resultado do cálculo de anomalia magnética residual realizada durante a rotina de inversão 3D dos dados. O mapa utilizou os dados magnéticos coletados em campo e os calculados, obtidos para a região a partir do sítio do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

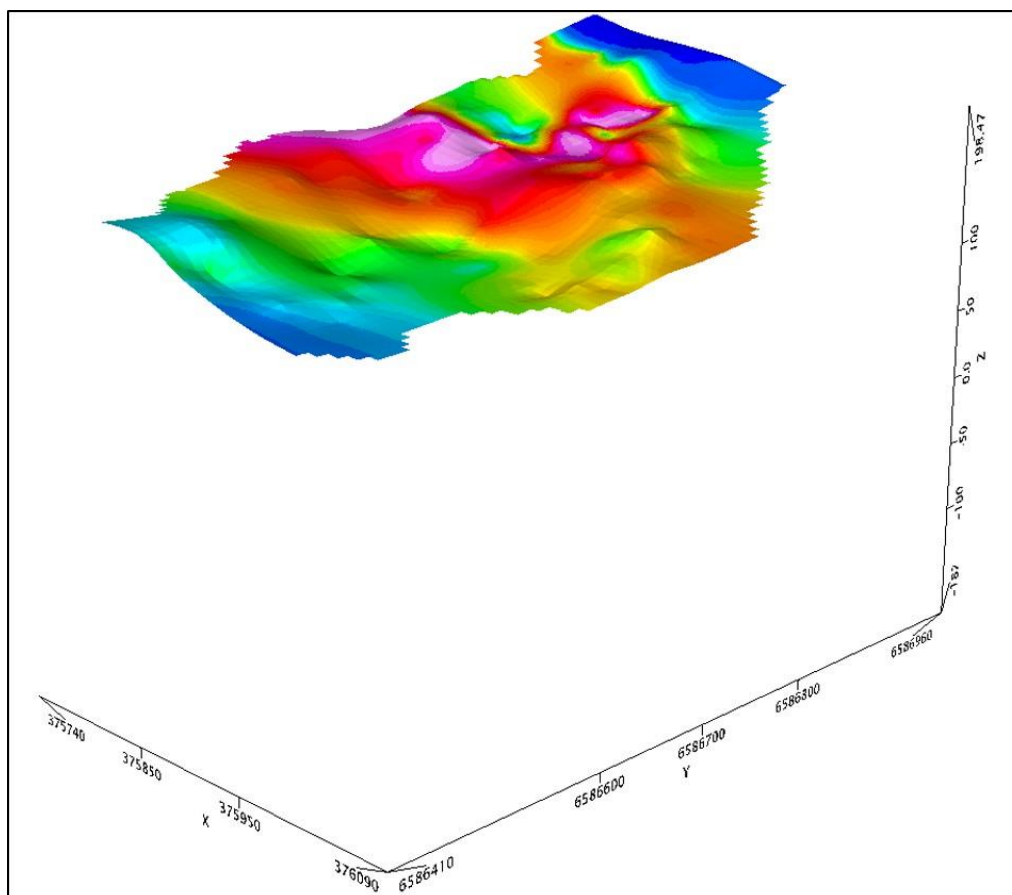


Figura 26: Anomalia Magnética Residual, com base nos dados de Campo Total.

A Figura 27 nos dá uma ideia do comportamento magnético ao sul no Cerro Grande e ao leste onde também ocorre uma faixa anômala surpreendente.

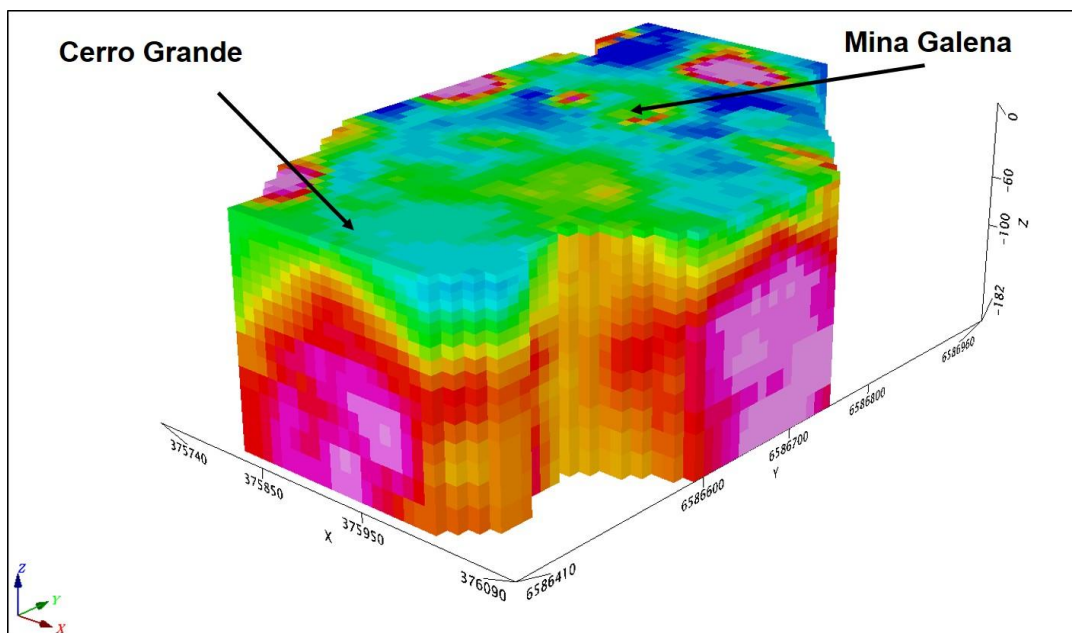


Figura 27: Modelo Geofísico mostrando grande faixa anômala ao sul no chamado Cerro Grande.

Na Figura 28, foi realizado um corte ao longo do eixo x, de modo que se possa observar as principais faixas anômalas em profundidade na região próxima a Mina Galena. O polígono preto ajuda a localizar a área de interesse, onde vemos três focos em baixa profundidade, duas em profundidade e uma intermediária. A anomalia em profundidade intermediária parece se conectar com a anomalia rasa no extremo norte, enquanto a anomalia central mais profunda parece se conectar com a anomalia central mais rasa.



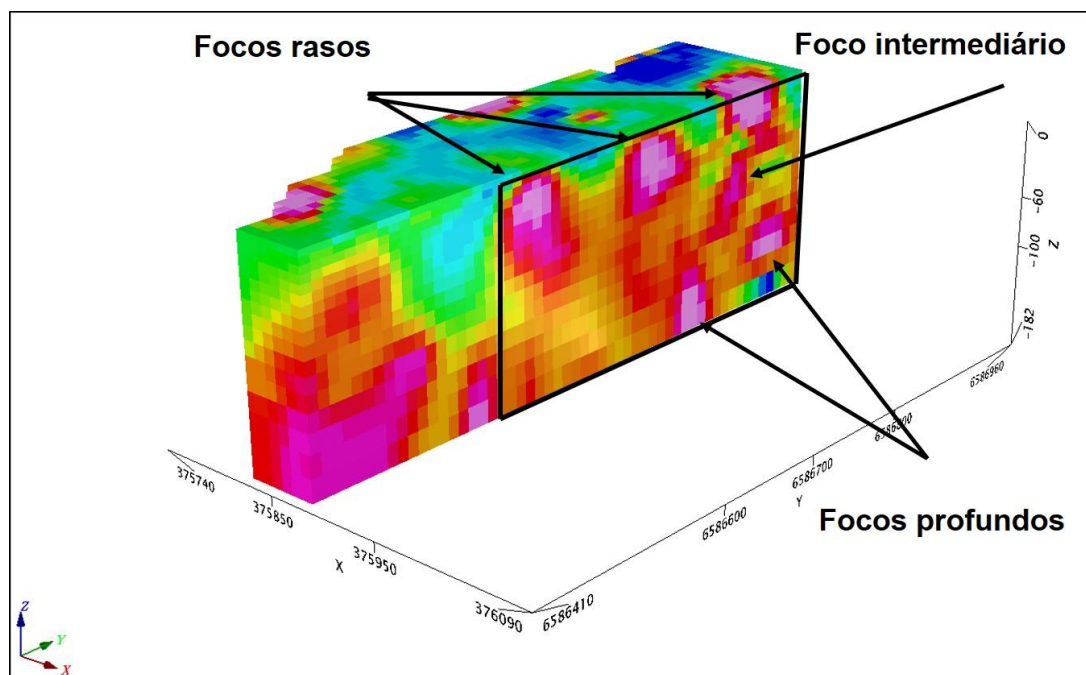


Figura 28: Modelo Geofísico 3D evidenciando as faixas anômalas de maior interesse.

Na Figura 29 é realizado um corte no eixo Y e é mostrada uma sequência das faixas anômalas vistas em X na Figura 28 dentro do polígono de interesse. A Figura 29A, mostra a anomalia rasa mais ao sul do polígono. É interessante observarmos que ela também apresenta uma faixa anômala moderada que se conecta com algo em profundidade que não é possível observarmos nesta imagem. As Figuras 29B e 29C são uma sequência da anomalia rasa central, com o avanço do corte em Y. O interessante é observarmos que ela é inversamente proporcional a intensidade da anomalia mais profunda, que por sua vez, parece ter origem na grande faixa anômala Leste vista na Figura 27.

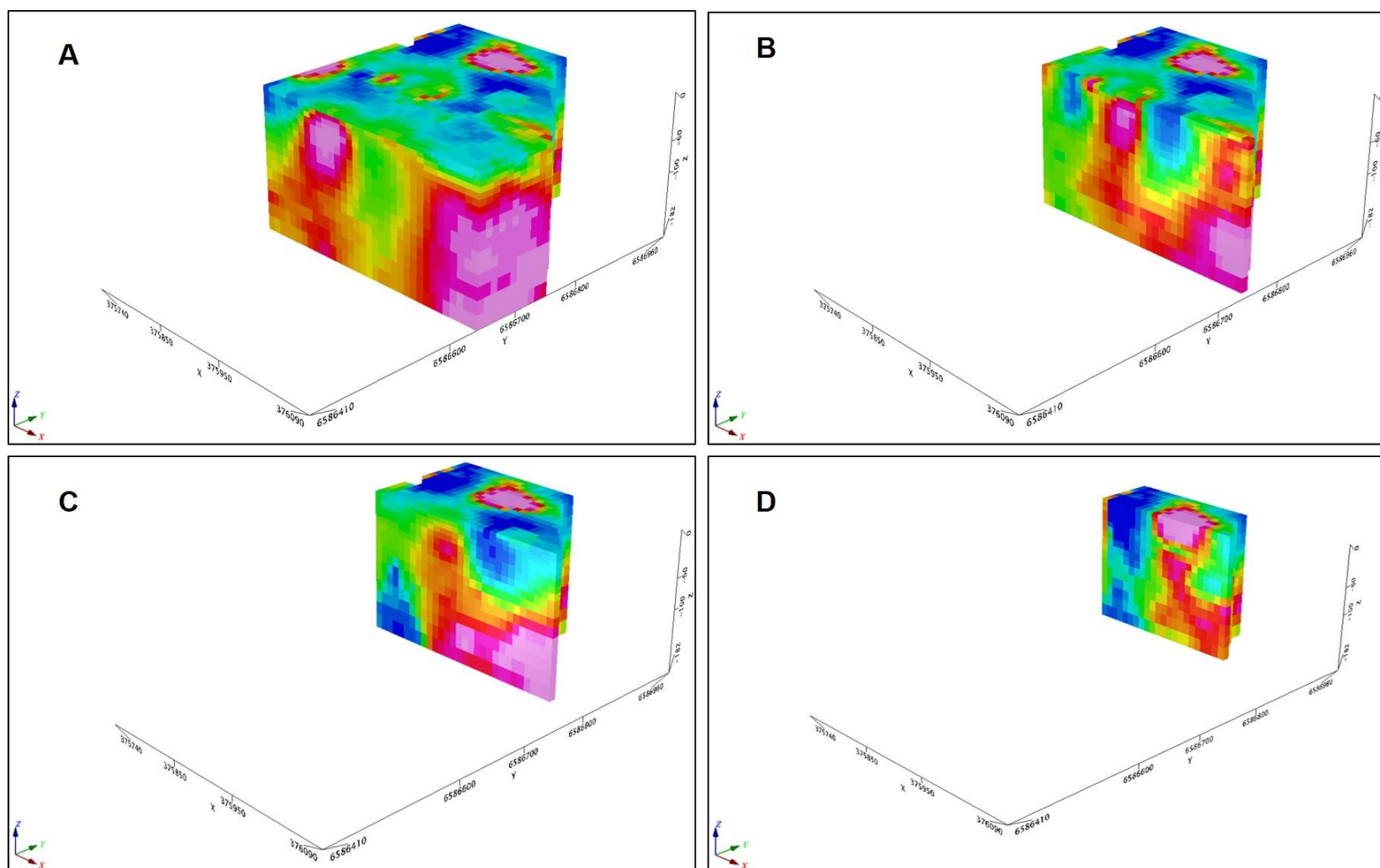


Figura 29: Modelo Geofísico 3D. Corte em sequência ao longo do eixo Y mostrando a evolução das faixas anômalas.

A Figura 29D mostra a faixa anômala rasa do extremo norte da área acompanhada novamente por uma faixa ou corredor anômalo que se desloca em profundidade para sudeste.

A Figura 30 apresenta uma manipulação da intensidade magnética, onde foi feito uma corte nos valores ao longo do eixo Z, de modo que somente os dados anômalos fossem visualizados no modelo em duas orientações espaciais. Na Figura 30A temos uma visualização normal do corte com o Cerro Grande ao Sul, e podemos notar claramente todas as faixas anômalas apresentadas anteriormente. A Figura 30B está com o norte invertido, de modo que podemos observar da outra lateral o comportamento das três faixas anômalas rasas, sendo que a faixa ao norte realmente parece ter uma continuidade em profundidade para sudeste.

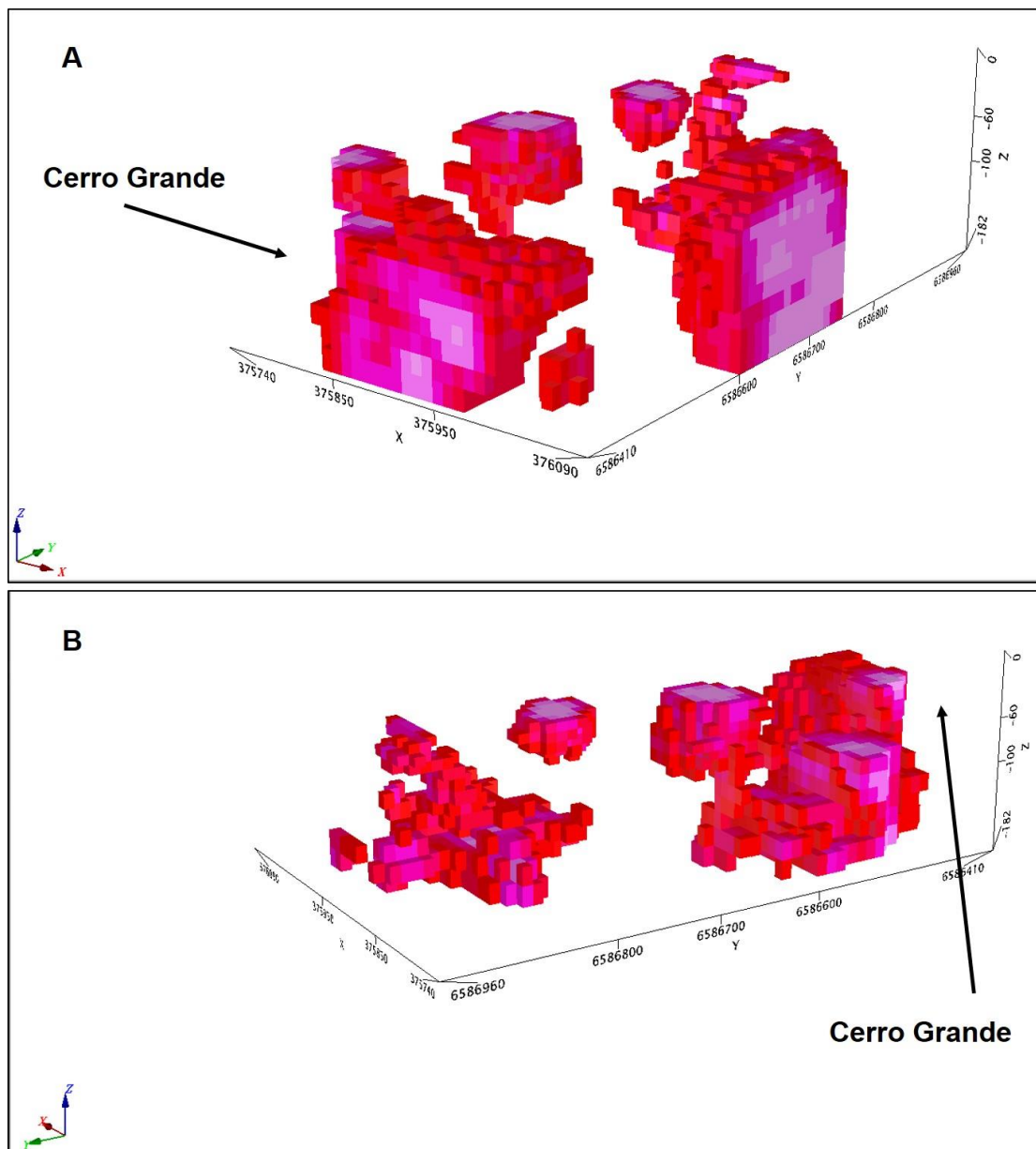


Figura 30: Modelo Geofísico 3D. Corte dos valores anômalos. A - Cerro Grande ao Sul (vista normal). B - Visualização com o norte invertido.



## 5 Integração dos dados

Neste capítulo foram integradas e apresentadas as principais discussões referentes aos resultados obtidos no capítulo anterior para a região do estudo. O objetivo foi analisar de forma conjunta os dados, os quais permitiram caracterizar da melhor forma a área do estudo. Foram utilizados os mapas apenas de contorno dos domínios bem como das principais fontes anômalas. O mapa Geológico de Rost (2006) foi utilizado como base da geologia da região.

A Figura 31 mostra a correspondência entre os domínios magnéticos e radiométricos ternário RGB, com um paralelo também com o Mapa do Fator *F*, que aqui foi proposto como um mapa de domínio hidrotermal. Podemos perceber que existe correspondência entre os domínios magnéticos A, B e C com o domínio ternário A e parte do B1 e B2. Estas áreas estão relacionadas com as regiões anômalas do Fator *F*. São áreas que fazem parte do chamado Monzogranito Heterogêneo e a mudança de fácies deste granito pode ter relação na resposta geofísica. O domínio Ternário C corresponde ao domínio magnético D, e representam a fácies Cerro Grande, que é descrito como um Riólito Porfírico. O fator *F* não revelou possível alteração hidrotermal nesta região. O fator de grande relevância foi o alto teor de  $eTh$ , que pode ser explicado devido a dois fatores: o primeiro envolve o fato de que o Tório, dos três elementos averiguados, é o menos móvel, ou seja, trata-se de um resistato. O segundo, diz respeito que os riólitos podem resistir mais ao intemperismo do que o monzogranito heterogêneo que segundo Rost (2006), possui muita biotita e minerais acessórios de alteração. A combinação dos dois fatores, aliados a topografia que na região do Cerro Grande é mais elevada, pode ter servido de condição para uma discrepância tão grande entre estes elementos.

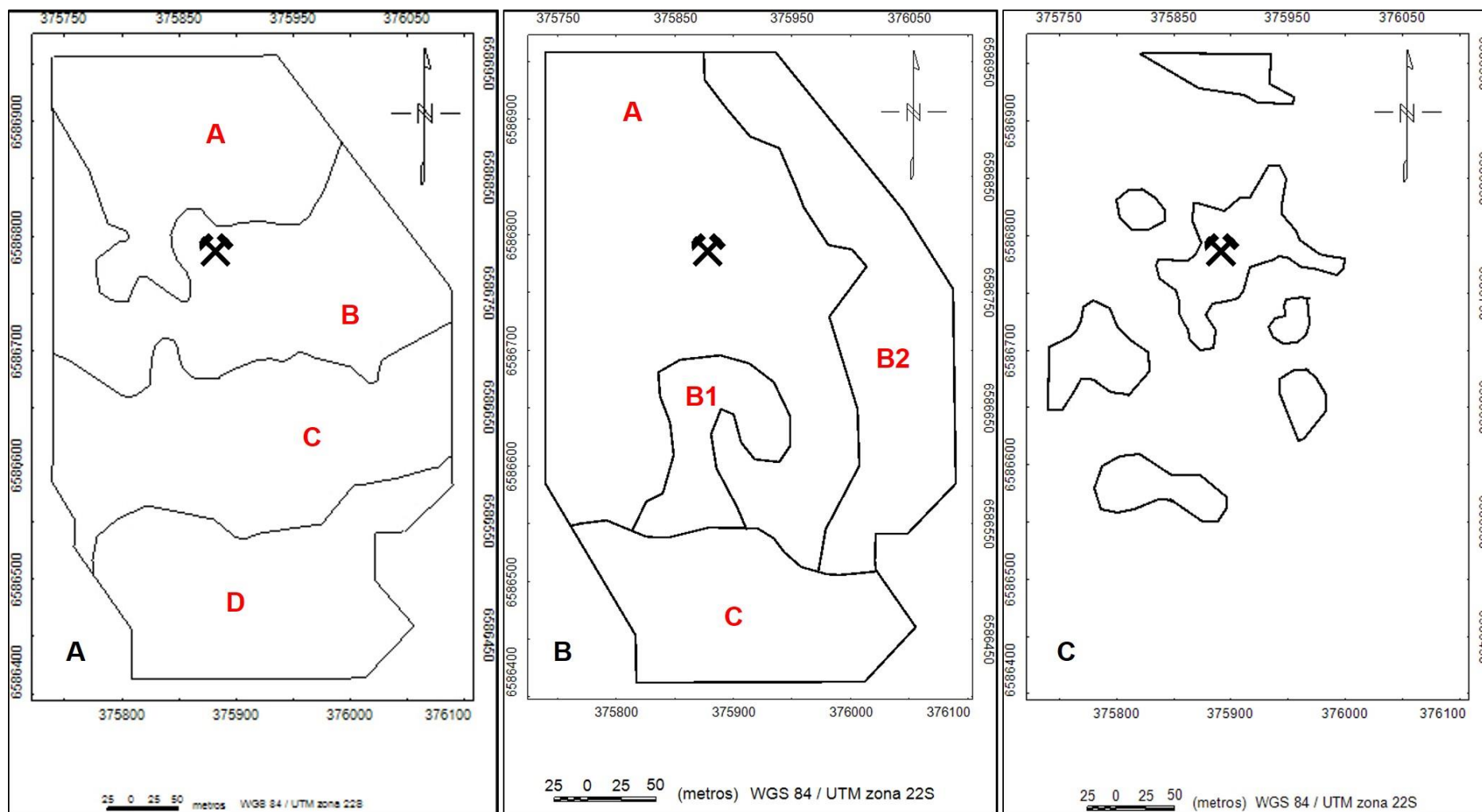


Figura 31: Mapas de contorno das anomalias. A - Domínios magnéticos no mapa de Campo Total com redução ao pólo. B - Domínios radiométricos ternários RGB. C - Domínio hidrotermal com base no fator  $F$ .

Segundo Verduzco (2004), a utilização das derivadas do campo magnético total pode ser empregada para o estudo de fontes rasas, uma vez que o filtro amplifica as respostas de baixo comprimento de onda e alta frequência, e minimiza as anomalias de grande comprimento de onda e baixa frequência. Os resultados da derivada horizontal mostram maior intensidade no centro das fontes anômalas. A derivada horizontal destacou a variação na horizontal dos valores tratados, nas direções X e Y. Com isso, foi possível localizar as fontes das anomalias, e obter informações sobre as características do contato entre o corpo alvo e a encaixante. Já o resultado da derivada vertical, apresenta anomalias nas bordas destas fontes rasas, diminuindo de intensidade para o centro da fonte. As Figuras 32, 33 e 34 mostram o conjunto de derivadas utilizado para o estudo, com destaque para as derivadas de ordem 0,5 que mostraram melhor eficácia e menos ruído que as demais. Todos os mapas de derivadas mostraram basicamente dois *trends* anômalos em uma direção aproximadamente NW–SE, indicados em vermelho nas imagens. A exceção é a segunda derivada em Y (Figura 33B), que apresenta um *trend* de orientação NE–SW.

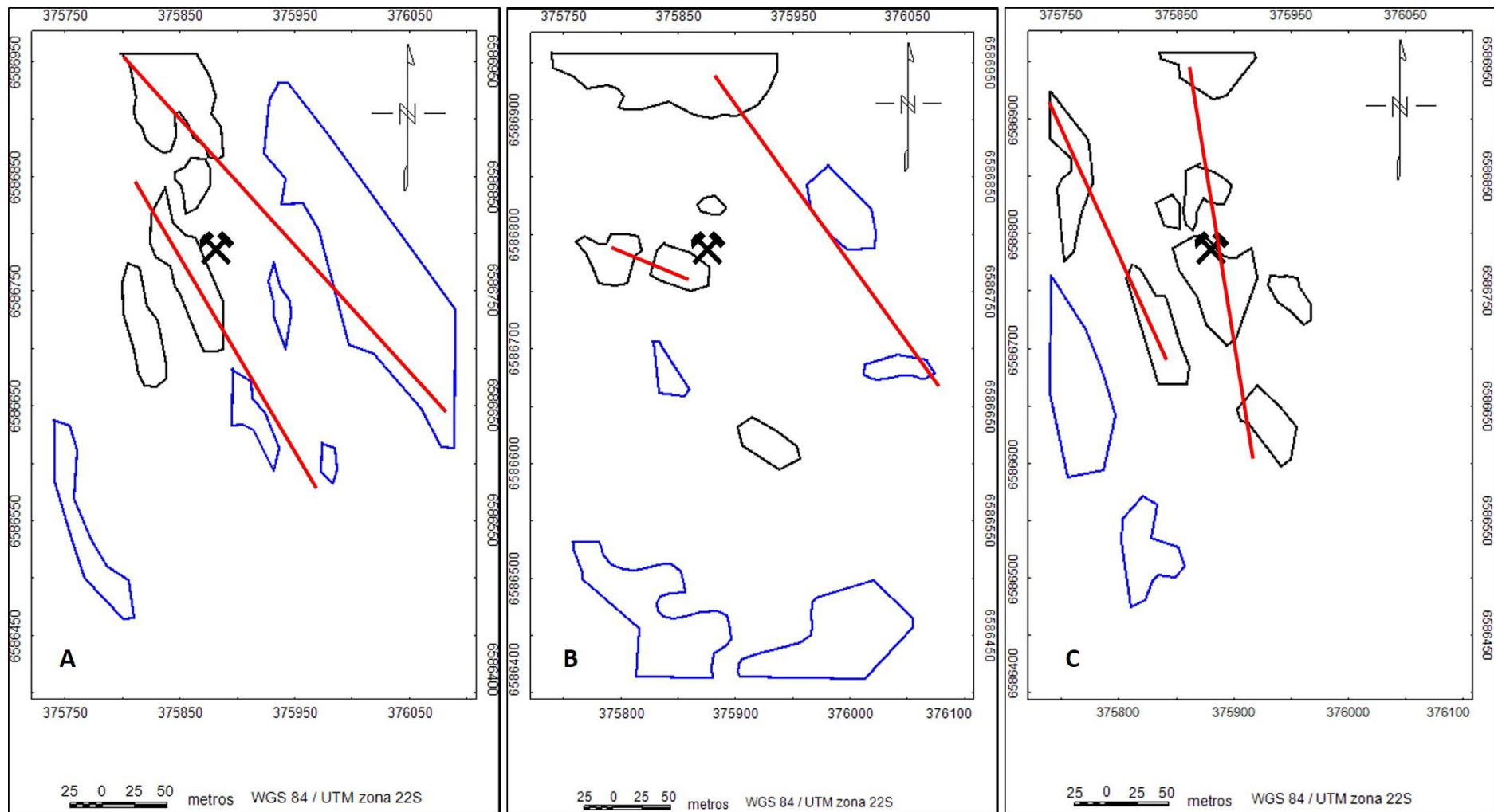


Figura 32: Primeira derivada em x, y e z. Os polígonos pretos são de anomalias mais intensas e os polígonos azuis são de média a alta. Os traços vermelhos mostram as regiões de maior interesse.

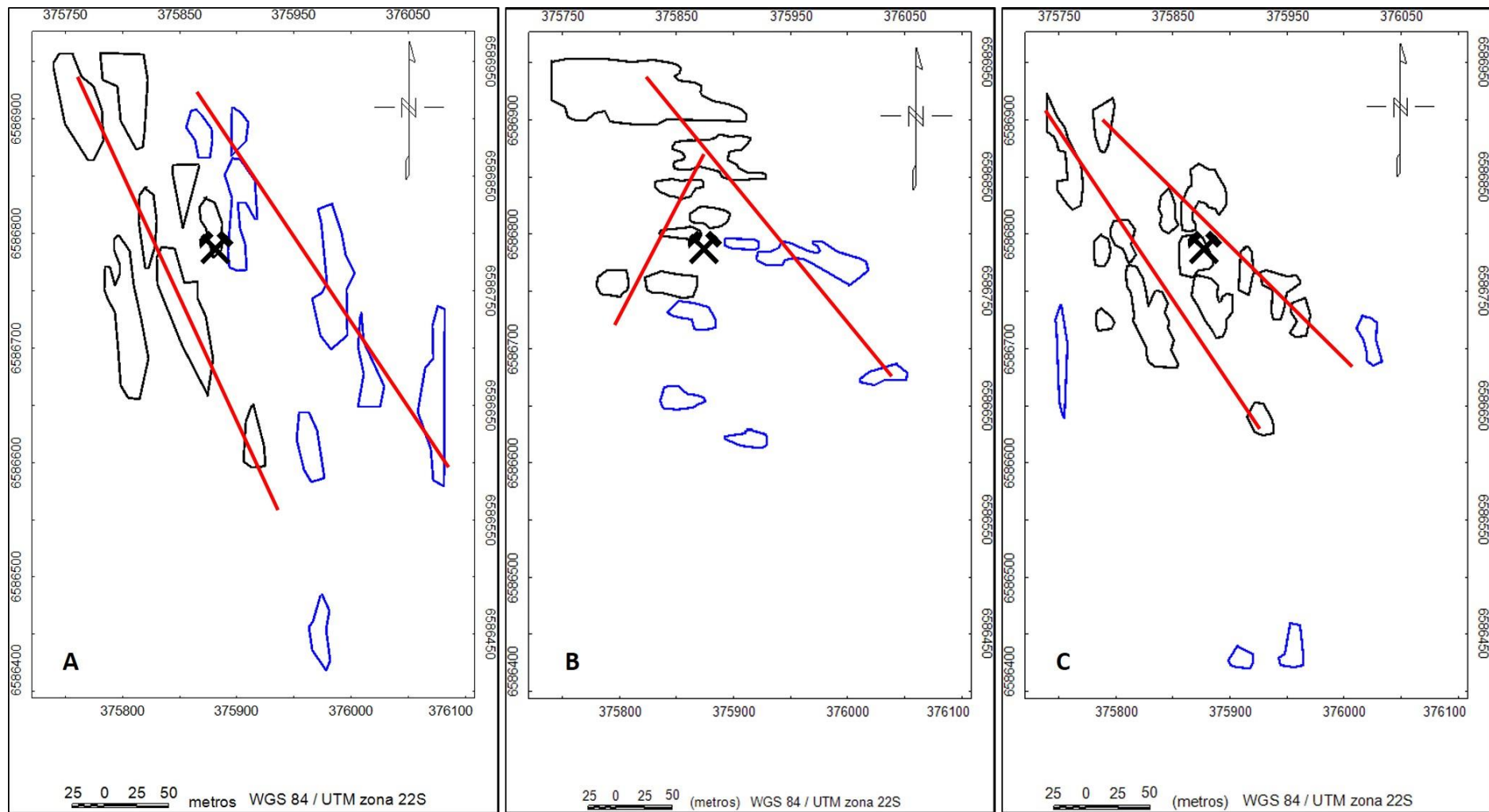


Figura 33: Segunda derivada em x, y e z. Os polígonos pretos são de anomalias mais intensas e os polígonos azuis são de média a alta. Os traços vermelhos mostram as regiões de maior interesse.

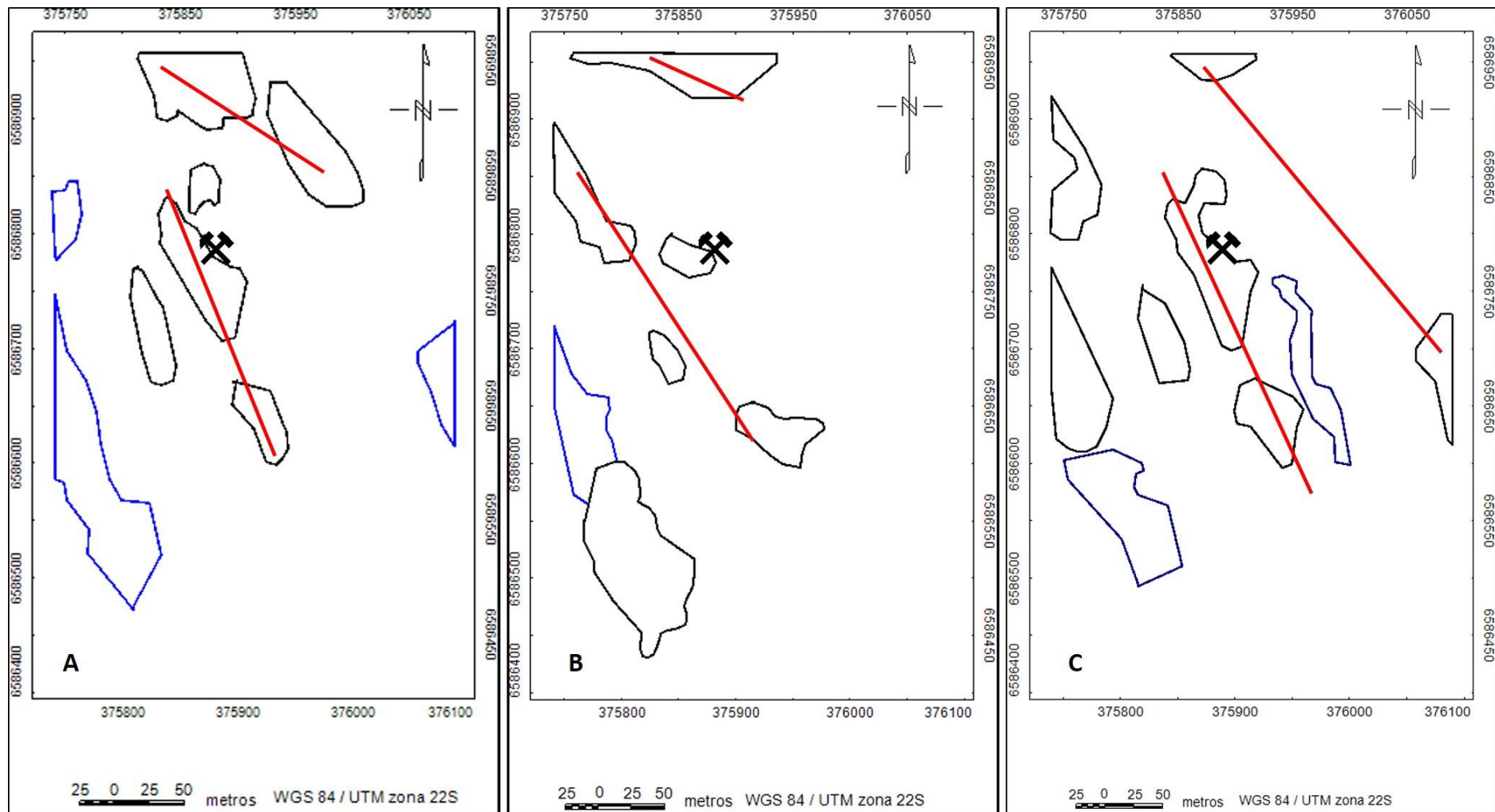


Figura 34: Derivada de ordem 0,5 em x, y e z. Os polígonos pretos são de anomalias mais intensas e os polígonos azuis são de média a alta.

Os traços vermelhos mostram as regiões de maior interesse

A Figura 35 apresenta os contornos dos mapas de ASA, ISA e GHT, cada qual com a sua característica. O ASA é um filtro que tem a capacidade de mapear bordas dos corpos, principalmente em fontes rasas, com amplitudes máximas nas bordas e conforme aumenta a profundidade os valores são deslocados (Li, 2006). A Figura 35A, foi realçada com a linha verde na região mais interessante. Os dois focos anômalos principais (polígonos pretos) produzem forte intensidade no centro, isso significa que estas posições podem ser consideradas as bordas de um corpo anômalo. Quando analisamos a Figura 26A com o modelo de intensidades anômalas da área, (Figura 30A e Figura 30B), percebemos que existem respostas intensas na região norte e na região central, porém no modelo, estas respostas ocorrem mais ao centro, ou seja a Figura 35A está mostrando as possíveis bordas destes corpos.

O ISA é considerado por Cooper & Cowan (2008), um filtro de destaque de anomalias, mas não de bordas. Suas respostas produzem focos de maior intensidade sobre o centro dos diminuindo para zero no limite dos corpos anômalos. A Figura 35B, mostra inúmeras áreas que poderiam ser centros de corpos, porém no exercício de integração com os outros mapas, se percebeu que a região principal está concentrada ao centro em direção ao norte. Estas feições mais interessantes são marcadas pela linha verde na figura. Quando comparados, ASA e ISA percebe-se que as feições entre ambos são compatíveis. A grande anomalia ao norte de ASA na Figura 35A pode ser comparada com a anomalia de médio a grande porte ao norte de ISA, na Figura 35B. As duas anomalias centrais do ASA também podem ser comparadas com as anomalias centrais de ISA, com a diferença que em ISA, estas regiões anômalas estão divididas em três áreas intensas, e o mapa de ASA compreende duas fontes: uma intensa e outra moderadamente intensa. Ou seja, podemos admitir que um mapa complementa o outro: o ASA nos dá a noção das bordas dos corpos e o ISA nos mostra o centro dos corpos.



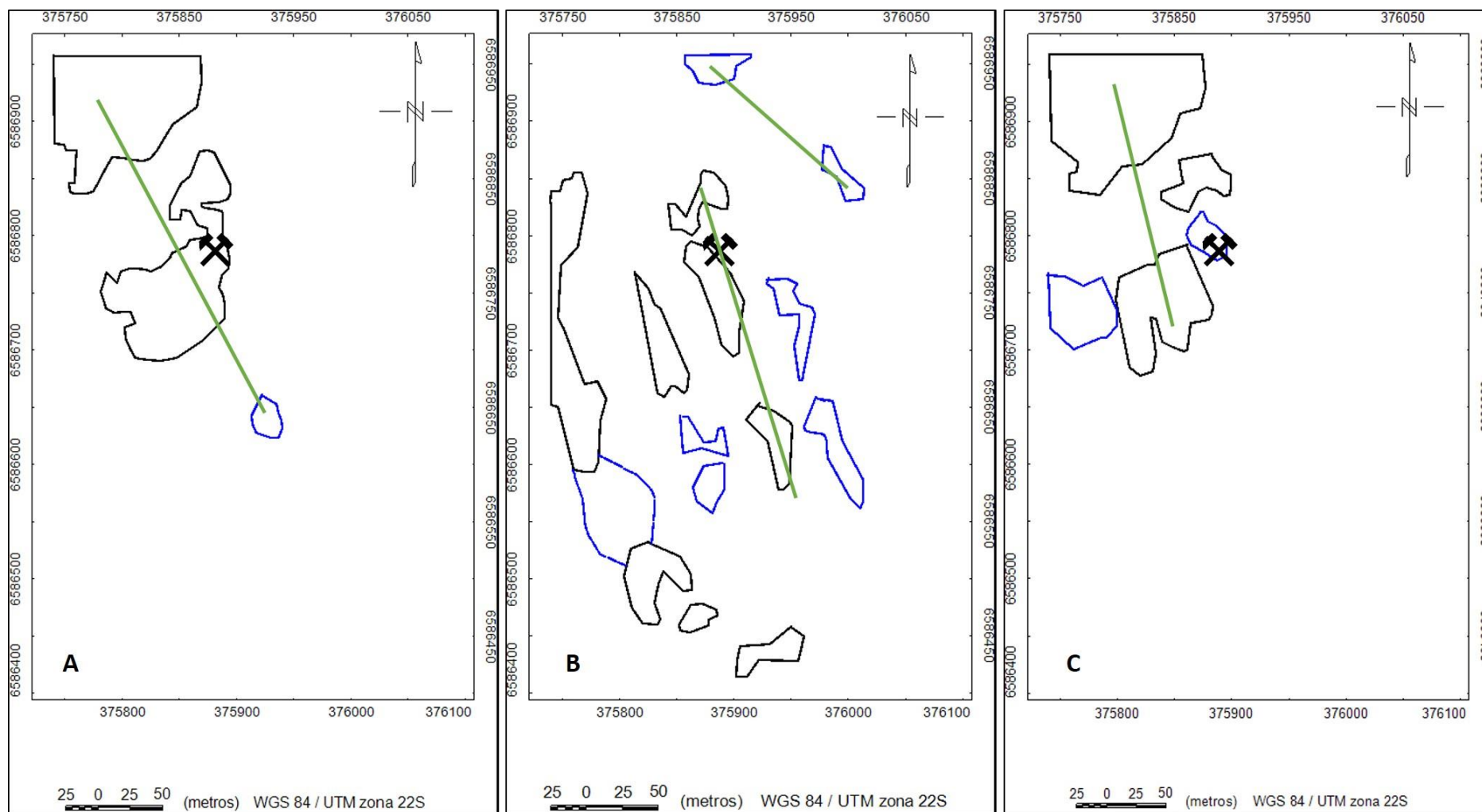


Figura 35: A – Amplitude do Sinal Analítico. B – Inclinação do Sinal Analítico. C – Gradiente Horizontal Total. Os polígonos pretos são de anomalias mais intensas e os polígonos azuis são de média a alta. Os traços verdes mostram as regiões de maior interesse.



O GHT é outro filtro de bordas de corpos. Segundo Ferreira et al. (2013), este filtro realça as altas frequências posicionando as anomalias muito próximas das bordas dos corpos. Segundo Cooper & Cowan (2008), é um filtro de aprimoramento de detecção das bordas de corpos anômalos, ou seja, o GHT complementa o ASA. Na Figura 35C, percebemos que o GHT refinou o resultado do ASA. Claramente ele separou o que em ASA era uma grande anomalia central para dois focos anômalos na mesma região. Isto é importante para entendermos melhor a distribuição dos corpos em profundidade.

O filtro GHT\_ISA consiste em aplicar um filtro GHT sobre dados já filtrados com ISA. É outro método que busca mapear estruturas rasas do embasamento, realçando e posicionando os picos de amplitudes nas bordas dos corpos causadores, de acordo com Verduzco (2004). Na Figura 36A, as linhas amarelas mostram as áreas de interesse quando comparadas com os mapas anteriores. O GHT\_ISA acabou separando inúmeras fontes anômalas, e quando comparada com as Figura 30A e 30B, podemos inferir que este filtro capturou as anomalias rasas e em profundidade sobrepondo-as no mapa, o que não aconteceu nas Figura 35A e 26C. No sul da imagem também são vistas algumas fontes anômalas que podem estar associadas ao contato entre o Riolito Cerro Grande e o Monzogranito Heterogêneo, porém as falhas nesta região são inferidas como NE–SW. O mapa de Fator  $F$  (Figura 16), também não indica que a região sul seja portadora de alteração hidrotermal, e como as mineralizações da área estão relacionadas com hidrotermalismo em baixas profundidades, a porção sul da área não seria um alvo potencial.

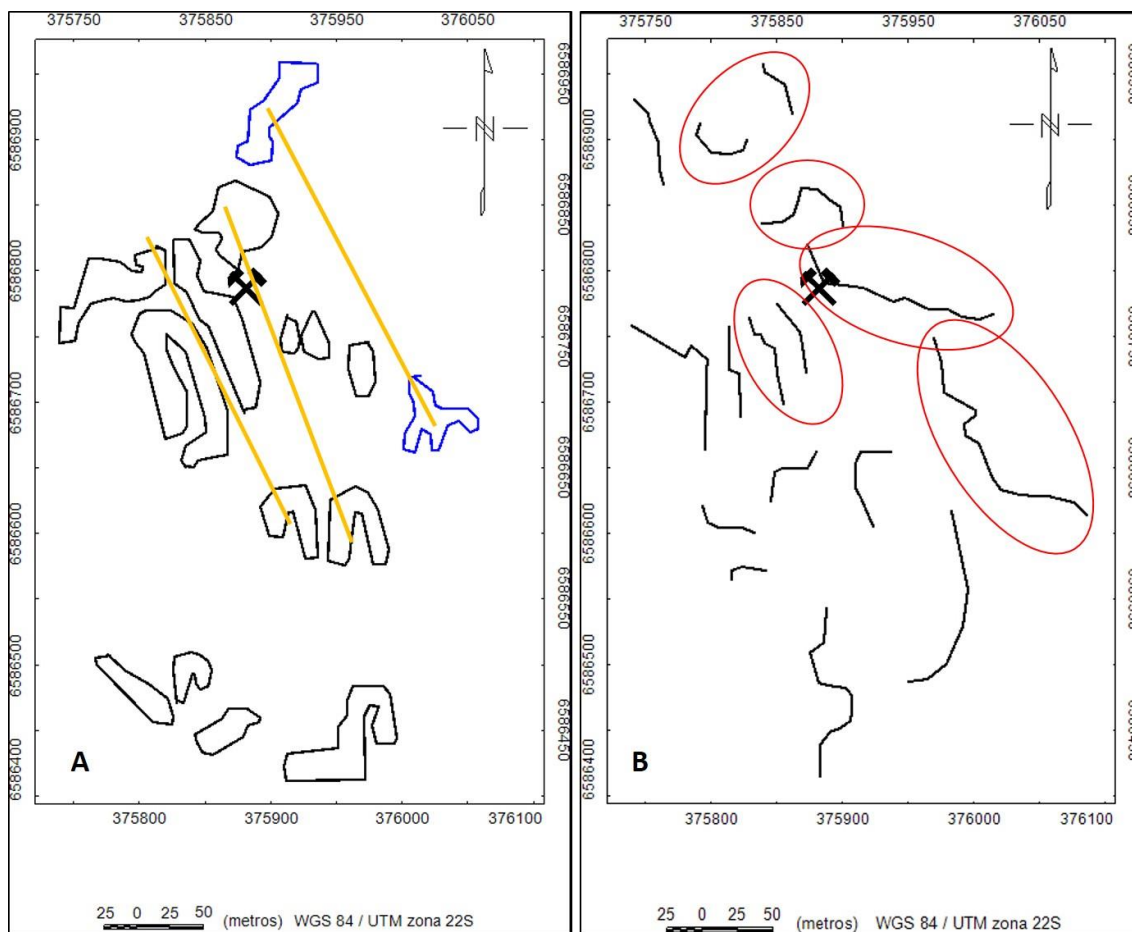


Figura 36: A – Gradiente Horizontal Total com Inclinação do Sinal Analítico. Os traços amarelos mostram as regiões de maior interesse. B – Inclinação do Sinal Analítico com Gradiente Horizontal Total. As elipses mostram os possíveis contornos de corpos anômalos. Os polígonos pretos são de anomalias mais intensas e os polígonos azuis são de média a alta.

O mapa de ISA\_GHT, segundo Ferreira (2013), ressalta as bordas e limites dos corpos anômalos e não é sensível a profundidade, produzindo anomalias intensas em corpos rasos ou profundos. Na Figura 36B, as elipses destacam as áreas que seriam de maior interesse quando combinadas com os demais mapas, de modo que se tentou realçar as regiões anômalas Leste, central e norte. O foco ou pico anômalo representaria um esboço do que seria o ou os, corpos causadores, lembrando novamente que este filtro não atenua profundidades. Por isso a importância da utilização dos filtros e demais mapas de forma combinada, juntamente com os dados da geologia.

Por fim, ao analisar todos os mapas, chegou-se a um conjunto integrado dos principais dados de intensidades gerados pelos diversos filtros aplicados. Percebeu-se que os dados apontavam para regiões anômalas na porção central da área, na porção leste e na porção norte, com fontes mais rasas e, pelo menos, duas fontes um pouco mais profundas. Com isso, foi elaborado um mapa discriminando estas feições. O mapa de integração dos dados (Figura 37A), onde as elipses pretas representam possíveis corpos anômalos mais rasos e as elipses de coloração cinza, representam possíveis corpos anômalos mais profundos. As Figura 37B e Figura 37C são, respectivamente, os domínios magnéticos e hidrotermal, sobrepostos com a posição destes corpos anômalos abordados na Figura 37A. Desta forma, ao analisarmos estes dados em conjunto com o mapa geológico de Rost (2006) (Figura 5), percebemos que tanto a antiga cava da Mina Galena, quanto o domínio hidrotermal e os novos possíveis alvos, estão dentro da rocha denominada Monzogranito Heterogêneo. Outro fator interessante é a região anômala a Leste. Se analisarmos com atenção o mapa da Figura 5, existe uma falha transcorrente deslocando o Riolito Porfírico na direção NE–SW. Se compararmos as anomalias Leste e Sul (Riolito Porfírico Cerro Grande), elas possuem a mesma intensidade, o que significa que este riolito possui prolongamento maior do que está registrado no mapa. O modelo de Depósito Epitermal de média a baixa sulfetação da Mina Galena, segundo Rost (2006) e Henrichs (2010), é de baixas profundidades e está associado possivelmente a intrusões sub-vulcânicas do Riolito Porfírico.

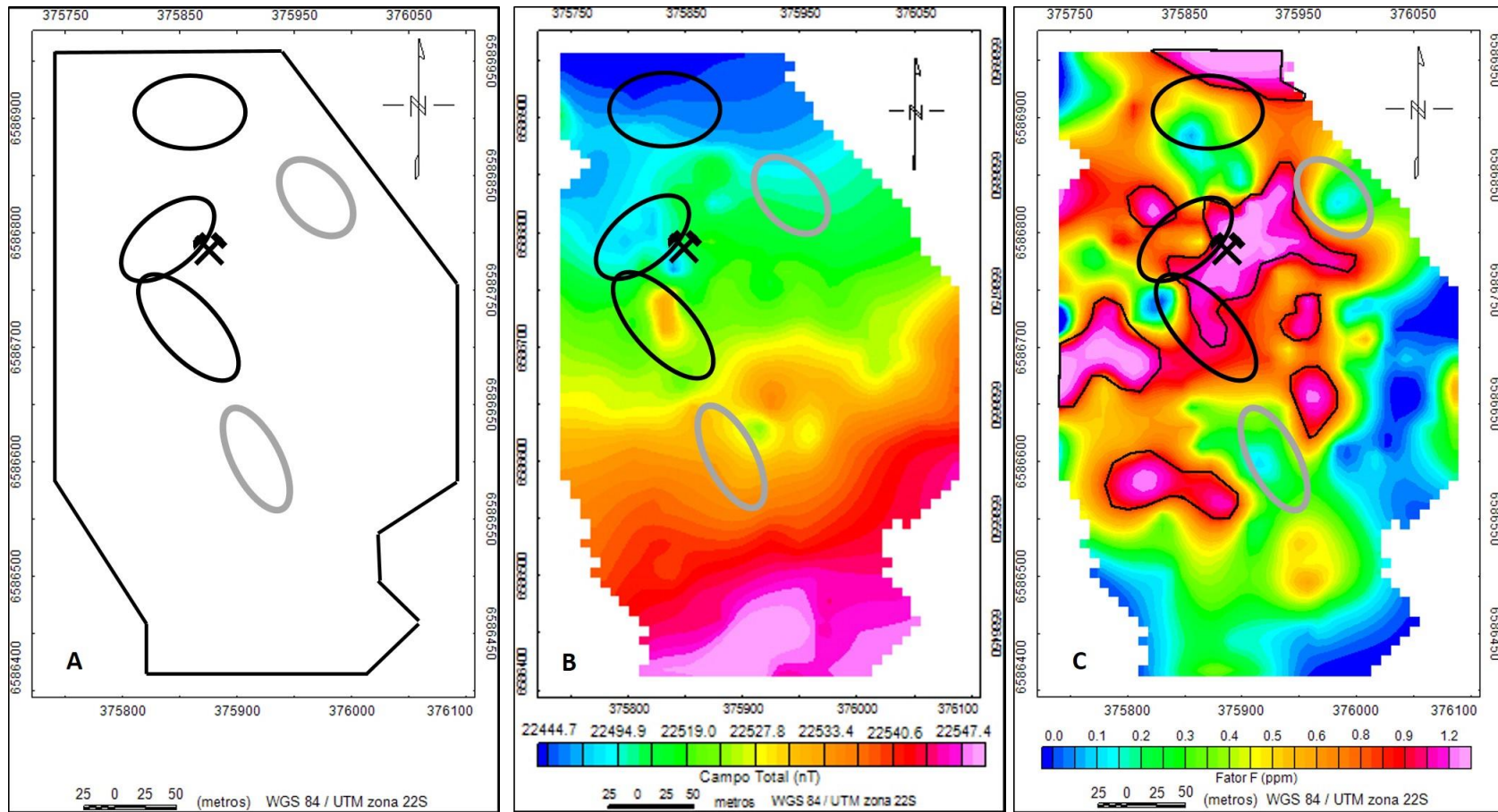


Figura 37: A – Integração dos dados com a inferência dos locais de maior interesse prospectivo com base nos mapas radiométricos, magnetométricos e do modelo geofísico 3D. B – Sobreposição das áreas de interesse no mapa magnético de Campo Total. C – Sobreposição das áreas de interesse no mapa de Fator  $F$ . As elipses de cor preta representam fontes rasas. As elipses de cor cinza representam fontes profundas.

## 6 Conclusões

Uma primeira consideração que pode ser feita é com relação a diferença de resolução dos mapas aéreos regionais para um levantamento terrestre de detalhe como o realizado neste trabalho. Ficou evidente que para áreas reduzidas, como no caso da Mina Galena e região que geram anomalias muito localizadas de poucos metros (10 – 20 metros em média), o levantamento aéreo regional não consegue capturar os contrastes entre as fontes anômalas e os demais corpos rochosos. No Levantamento aéreo do Escudo Sul-Riograndense, somente o espaçamento entre as linhas de voo tem 500 metros de distância. Isso significa que este espaço precisa ser preenchido matematicamente, de forma que este levantamento é excelente para a averiguação das grandes estruturas e distinção de grandes corpos rochosos, mas insuficientes para detalhamento de corpos menores.

Os trabalhos anteriores de Rost (2006) e Henrichs (2010), indicam que na área o contexto geológico é tardio em relação aos processos tectônicos regionais, e com domínio de mecanismos estruturais de caráter rúptil. O aumento da intensidade de alteração tem relação direta com estruturas do tipo brechas, falhas, veios e fraturas, e esta alteração hidrotermal se intensifica na direção Leste da Mina Galena. Rochas subvulcânicas como o Riolito Porfiritico podem ser consideradas um grande potencial para a introdução dos fluidos do sistema de mineralização de Amaral Ferrador e são fonte de energia térmica.

Portanto é crucial o conhecimento da exata colocação e distribuição deste Riolito. Os dados expostos neste trabalho evidenciam um prolongamento do corpo para NNE. Isto pode ser observado nas derivadas de ordem 0,5, Figura 23A, 23B e 23C, nos modelos geofísicos, Figura 27, 30A e 30B, as quais no polígono de estudo são caracterizadas como anomalia Leste. As Figura 29C e Figura 29D, mostram uma espécie de conexão entre as anomalias rasas e a anomalia Leste. Isto pode ser uma evidência magnética desta contribuição de fluidos para a mineralização na região pelo estágio de colocação posterior do Riolito Porfiritico com relação ao Monzogranito Heterogêneo. Talvez estas fontes anômalas profundas sejam possíveis fontes alimentadoras da mineralização na área.

O espectro de potência radial (Figura 20) reforça a teoria de que se trata de mineralização epitermal de baixa profundidade uma vez que, a análise dos

comprimentos de onda nos diz que alguns corpos possuem intensidades há cerca de 35 metros e outros há cerca de 65 metros de profundidade.

De acordo com Hedenquist (1995) os depósitos epitermais não ocorrem isolados, portanto é fundamental uma melhor caracterização da região para uma possível descoberta de novos alvos. A análise em conjunto de todos os dados filtrados possibilitou a sugestão de algumas possíveis áreas potenciais de mineralização como visto na Figura 37A, apresentando três focos rasos e dois focos profundos.

Os novos possíveis alvos foram gerados com base na coleta e processamento de dados indiretos na região, ou seja, é necessária uma averiguação geológica mais aprofundada sobre as estruturas, a mineralização e seus controles. Com isso fica evidente a necessidade do vínculo geológico no emprego das técnicas de geofísica, por melhor que seja o processamento e a resolução dos dados obtidos.

Recomenda-se ainda uma averiguação nos contatos anômalos sul, região que ocorre o contato entre o Monzogranito Heterogêneo e o Riolito Porfirítico Cerro Grande, uma vez que possam existir algumas estruturas mineralizadas nesta interação, e, a anomalia a Leste da área. Seria necessária uma varredura ultrapassando o limite Leste para ver a extensão da anomalia, ou seja, ter uma ideia se a fonte intensa vista no modelo Geofísico 3D e na derivada de ordem 0,5 fazem parte do Riolito Porfirítico e qual sua extensão. Se de fato este Riolito porfirítico foi o agente que contribuiu para a mineralização da região, é fundamental que se conheça exatamente o limite do corpo.

Verificou-se, portanto, que a geofísica se constitui de uma ferramenta poderosa na identificação de regiões com grande potencial econômico. Trata-se de um recurso interessantíssimo para a avaliação de uma determinada região antes dos trabalhos de campo. Porém fica claro que se trata de um conhecimento indireto do objeto de estudo, sendo necessária sempre a integração com os dados geológicos. No exemplo deste trabalho mesmo com um número interessante de possíveis novos alvos, não pode ser descartada uma campanha de sondagens para o conhecimento real do que representam essas fontes anômalas.

Para as áreas potenciais determinadas neste trabalho, sugere-se além do detalhamento geológico, um trabalho envolvendo os métodos geoeletricos como eletrorresistividade e potencial espontâneo, de modo que se existe alguma mineralização, esta será percebida neste detalhamento.

## 7 Referências

Almeida, F. F. M., Amaral, G., Cordani, U., & Kawashita, K. (1973). The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazon River. In *The South Atlantic* (pp. 411-446). Springer US.

Bea, F. (1996). Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts. *Journal of petrology*, 37(3), 521-552.

Blakely, R. J., 1996. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press. 464 p.

Biondo, V.R., Mantovani, M.S.M, Louro, V.H.A. (2013). Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. In: *Terra e didática* 10: 29-51.

Copper, G. R. J.; Cowan, D. R., 2008. Edge enhancement of potential field data using normalized statistics. *Geophysics*. vol. 73, no. 3, H1–H4.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto aerogeofísico Escudo do rio grande do sul: Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Vol. I, Texto técnico. Lasa Prospecções S/A, 2010.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An introduction to the rock-forming minerals* (Vol. 2, p. 558). Hong Kong: Longman Scientific & Technical.

Dickson, B. L., & Scott, K. M. (1997). Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 187-200.

Erdi-Krausz, G., Matolin, M., Minty, B., Nicolet, J. P., Reford, W. S., & Schetselaar, E. (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data*. International Atomic Energy Agency Publication IAEA-TECDOC-1363, Vienna, Austria, 173.

Fernandes, L. A. D., Menegat, R., Costa, A. F. U., Koester, E., Porcher, C. C., Tommasi, A., ... & Camozzato, E. (1995). Evolução Tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-rio-grandense: Parte II-uma contribuição a partir das assinaturas geofísicas. *Brazilian Journal of Geology*, 25(4), 375-384.

Ferreira, F. J., de Souza, J., de B. e S. Bongioiolo, A., & de Castro, L. G. (2013). Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, 78(3), J33-J41.

Fragoso-Cesar, A. R. S. (1980). O Cráton do Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Sul-Riograndense. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 31, No. 1980, pp. 2879-2882). SBG Anais, Camboriú.

Frantz, J. C., & Botelho, N. F. (2000). Neoproterozoic granitic magmatism and evolution of the eastern Dom Feliciano Belt in southernmost Brazil: a tectonic model. *Gondwana Research*, 3(1), 7-19.

Garcia, F., Silveira, M. M., & Fries, M. (2011, August). Aquisição Magnetométrica na Caracterização de Feições Geológicas e Estruturais da Ocorrência de Cobre de Capão Grande, Município de Caçapava do Sul, RS. In *12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.

Garcia, F.P. (2013). Construção de um Sistema Geográfico de Informação voltado à prospecção mineral na região da Mina Galena, Amaral Ferrador, RS. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade do Rio Grande do Sul.

Gnojek, I., & Přichystal, A. (1985). A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, 23(4), 491-502.

Godoy, L. C. (2011). Radioanomalias no granito Serra do Carambeí-Pr e possíveis implicações no uso e ocupação do solo.



Grasty, R. L. (1975). Uranium measurement by airborne gamma-ray spectrometry. *Geophysics*, 40(3), 503-519.

Grasty, R. L., Mellander, H., & Parker, M. (1991). Airborne gamma-ray spectrometer surveying. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Hasenack, Heinrich; Weber, Eliseu. (Organizadores). Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul, escala 1:50.000. UFRGS Centro de Ecologia, Laboratório de Geoprocessamento. 2010.

Hedenquist, J.W. Exploration for Epithermal Gold Deposits. In *SEG Reviews*, Vol. 13, 2000, p. 245-277.

Heinrichs, I. A. (2010). Caracterização do sistema hidrotermal da Mina Galena, Amaral Ferrador, RS. Trabalho de Conclusão de curso. Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Hildenbrand, J.D., Costa, C.M. (2014). O Método Gamaespectrométrico Aéreo como Ferramenta de Mapeamento e de Exploração Mineral. In: *Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica* 88. Pág. 24-27.

IAEA (International Atomic Energy Agency). (1991). Airbone Gamma ray spectrometer surveying. Technical reports series number 323. Vienna.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2009). Geofísica de exploração. Oficina de Textos. Levantamentos Aerogeofísicos, Volume 1. In: *Catálogo Temático de Produtos*. Serviço Geológico do Brasil - CPRM. 2011.

Li, X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2), 13-16.

Moxham, R. M. (1963). Natural radioactivity in Washington County, Maryland. *Geophysics*, 28(2), 262-272.

Nabighian, M.N. 1974. Additional comments on the analytic signal of twodimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39(1): 85-92.

Oliveira, R.G. de; Medeiros, V.C. de. (2014). Aplicação de dados Aerogamaespectrométricos e Aeromagnetométricos no Mapeamento da faixa dobrada Seridó (RN/Pb) e de seu embasamento. In: Boletim 88, publicação da Sociedade Brasileira de Geofísica.

Pires, A. C. B., & Harthill, N. (1989). Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixas-Itapaci area, Goiás, Brazil. *Geophysics*, 54(10), 1326-1332.

Queiroz, F. C. (1975). Distribuição da radioatividade natural no perfil de um podzol tropical e suas implicações genéticas. *Distribuição da Radioatividade Natural no Perfil de um Podzol Tropical e suas Implicações Genéticas*.

Ribeiro, V. B., Mantovani, M. S., & Louro, V. H. A. (2014). Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terræ Didática*, 10(1), 29-51.

Robinson, E. S. (1988). *Basic exploration geophysics*. Virginia. Copyright: Jonh Wiley & Sons.

Rollinson, H. R. (2014). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge.

Rost, M. C. (2006). *Caracterização estrutural e petrográfica do paleossistema hidrotermal de Amaral Ferrador*. 87 f. Monografia de Conclusão de curso (graduação). Instituto de Geociências. UFRGS. Porto Alegre, RS.

Schon, J. H. (2004). *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*, ser. *Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration*.

Silva, S.M. da; Crosta, Á.; Ferreira, F.; Beurlen, H.; Silva, A.; Silva, M. Identificação gamaespectrométrica de placeres rutilo-monazíticos neoproterozóicos no sul da Faixa Seridó, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*. v. 28, p. 61-77, 2010.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1976). *DA Keys Applied Geophysics*.

Ulbrich, H. H. G. J., Ulbrich, M. N. C., Ferreira, F. J. F., Alves, L. S., Guimarães, G. B., & Fruchting, A. (2009). Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. I: revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U. *Geologia USP. Série Científica*, 9(1), 33-53.

Vasconcellos, R.M., Metelo, M.J., Mota, A.C.M., Gomes, R.D. *Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil*. Rio de Janeiro, CPRM, 1994. 165 p.

Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., & MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), 116-119.

White, N.C., Hedenquist, J.W. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. In *SEG Newsletter*, 1995, p. 9-13.

Wildner, W.; Ramgrab, G.E.; Lopes, R. da C.; Hoff, R.; Iglesias, C. M. da F. *Mapa Geológico do Rio Grande do Sul*. CPRM, Porto Alegre. CD-Rom. 2006.

Wilford, J. R., Bierwirth, P. E., & Craig, M. A. (1997). Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 201-216.

Withehead, Nancy. *Montaj Grav/Mag interpretation. Sistema de processamento, Análise e visualização para inversão 3D de dados de campos potenciais para oásis montaj. Tutorial e guia do usuário. Livro de Manual*. Geosoft Inc. (2013).

## GEO 03015 – PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

<b>Título da Monografia:</b> <i>Lamaespectrometria e magnetometria aplicados à</i>
<i>determinação de novas áreas de exploração mineral da região de Amaral</i>
<b>Autor:</b> <i>Siegbert Roos</i>
<i>Porção Oeste do cinturão</i>
<b>Orientador(es):</b> <i>Jairo Francisco Savian e Juliana Charão Marques</i>
<b>Nota final (1 até 10):</b> <i>9,2</i>
<b>Examinador:</b> <i>Leonardo Cardoso Renner</i>
<b>Data:</b> <i>19/12/17</i>

Ferrador-RS,  
Dom Feliciano

		Sim	Não	Em parte
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	X		
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	X		
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	X		
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	X		
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	X		
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	X		
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	X		
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	X		
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?			X
10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?			X

Página	Correções obrigatórias
	<i>Necessidade de revisar as referências bibliográficas citadas no texto que não estão nas referências no final da monografia. Foram contadas cerca de 23 referências incompletas e/ou faltando.</i>
26	<i>Editar sistema de coordenadas do mapa. Confuso.</i>

*fh*

## GEO 03015 – PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia: <i>gammaespectrometria e magnetometria aplicadas à determinação de níveis locais de exph. mica na reg. de Amambá Grenados - RS</i>
Autor: <i>Siegbert Roos</i>
Orientador(es): <i>Jairo Francisco Barrios, Juliana Marques Chaves</i>
Nota final (1 até 10): <i>9,5</i>
Examinador: <i>Nelson Amorchi Lisboa</i> Data: <i>19/12/2017</i>

		Sim	Não	Em parte
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	X		
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	X		
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	X		
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	X		
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	X		
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	X		
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	X		
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	X		
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	X		
10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?	X		

Página	Correções obrigatórias
<i>15</i>	<i>Carica de uma localização regional</i>
<i>24</i>	<i>A Formação Fouga do Calral não aparece no mapa fig 5</i>
<i>68</i>	<i>Perce que a escala é 1:250000</i>
<i>72</i>	<i>Tracar a região por área de detalhe</i>
<i>75</i>	<i>Localizar a mina no mapa</i>
<i>79</i>	<i>Tracar equivale com coincide, o por a</i>

*Niel*

### GEO 03015 – PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

<b>Título da Monografia:</b> Gamaespectrometria e magnetometria aplicados à determinação de novos alvos de exploração mineral na região de Amaral Ferrador – RS, porção Leste do Cinturão Dom Feliciano	
<b>Autor:</b> Siegbert Roos	
<b>Orientador(es):</b> Prof. Dr. Jairo Francisco Savian e Prof. Dra. Juliana Charão Marques	
<b>Nota final (1 até 10):</b> 9,0	
<b>Examinador:</b> Silvana Bressan Riffel	<b>Data:</b> 19/12/2017

		Sim	Não	Em parte
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	x		
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	x		
3	As ilustrações são úteis e adequadas?			x
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	x		
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	x		
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	x		
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	x		
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	x		
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	x		
10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?			x

Página	Correções obrigatórias
23	Fig 4 Legenda mapa geológico
26	Coordenadas; adequar legenda Rever fórmulas ao longo do texto
51	completar o nome do relatório (2010)

SBR/R