

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

LENON MELO ILHA

**LEVANTAMENTO MAGNETOMÉTRICO EM SEQUÊNCIA  
METAULTRAMÁFICA MINERALIZADA EM CROMITA, SÃO SEPÉ (RS)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – Campus de Rio Claro, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro – SP

2017

LENON MELO ILHA

**LEVANTAMENTO MAGNETOMÉTRICO EM SEQÜÊNCIA  
METAULTRAMÁFICA MINERALIZADA EM CROMITA, SÃO SEPÉ (RS)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – Campus de Rio Claro, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen

Dr. Mariana Aparecida Fernandes Montanheiro

Resultado: Aprovado

Rio Claro, 30 de Junho de 2017.

549 Ilha, Lenon Melo  
I279L Levantamento magnetométrico em sequencia  
metaultramáfica mineralizada em Cromita, São Sepé (RS) /  
Lenon Melo Ilha. - Rio Claro, 2017  
53 f. : il., figs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: César Augusto Moreira

1. Mineralogia. 2. Pesquisa mineral. 3. Cromo. 4.  
Ultramáfica. 5. Magnetometria. I. Título.

## RESUMO

Estudos de prospecção e pesquisa mineral por meio da geofísica são fundamentais para o reconhecimento e incorporação de novas reservas, devido ao baixo custo em relação aos métodos diretos de investigação e a possibilidade de cobertura de amplas áreas. Este trabalho consiste na aplicação do método da Magnetometria Terrestre, na caracterização de um corpo ultramáfico metamorfizado e mineralizado em cromo, a área de estudo se localiza na zona rural do município de São Sepé (RS) e situada nos limites das rochas do Escudo Sul Riograndense. Os litotipos presentes na área são arenitos, rochas metavulcânicas e rochas máficas/ultramáficas. Foram realizadas 1677 leituras em linhas perpendiculares a direção principal do corpo ultramáfico, com espaçamento de 25 metros entre pontos de medida. Os mapas magnetométricos gerados revelam anomalias de alta intensidade, acima de 420nT no mapa de intensidade de campo total, relacionadas com as rochas ultramáficas. Os resultados demonstraram a aplicabilidade do método da magnetometria na individualização de ocorrências minerais magnéticas de dimensões métricas, e a possibilidade de uso na seleção de alvos para perfuração, amostragem e quantificação de teores, em rotinas de pesquisas por depósitos de cromo.

**Palavras-chave:** pesquisa mineral, cromo, ultramáfica, magnetometria

## **ABSTRACT**

Studies of mineral research and exploration through geophysics are fundamental for the recognition and incorporation of new reserves, due to the low cost in relation to the direct methods of investigation and the possibility of covering large areas. This work consists of the application of the Terrestrial Magnetometry method, in the characterization of a metamorphic and mineralized chrome mineralized body, the study area is located in the rural area of the city of São Sepé (RS) and located in the limits of the rocks of the Escudo Sul Riograndense. The lithotypes present in the area are sandstones, metavulcanic rocks and mafic / ultramafic rocks. There were 1677 readings in lines perpendicular to the main direction of the ultramafic body, with spacing of 25 meters between measurement points. The magnetometric maps generated reveal high intensity anomalies related to ultramafic rocks. The results demonstrated the applicability of the magnetometry method in the individualization of magnetic mineral occurrences of metric dimensions, and the possibility of use in the selection of targets for drilling, sampling and quantification of contents, in search routines for chromium deposits.

**Keywords:** mineral exploration, chromium, ultramafic, magnetometry

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	10
<b>FIGURA 2.</b> MAPA GEOLÓGICO ESQUEMÁTICO DO ESCUDO SUL-RIOGRANDENSE, DETALHANDO AS QUATRO UNIDADES TECTÔNICAS PRINCIPAIS (BATÓLITO PELOTAS, CINTURÃO PORONGOS, BLOCO SÃO GABRIEL, BLOCO TAQUAREMBÓ), E AS DESCONTINUIDADES QUE OS DELIMITAM (BORBA, 2006).....	12
<b>FIGURA 3.</b> MAPA GEOLÓGICO DO BLOCO SÃO GABRIEL (HARTMANN, 2000).....	13
<b>FIGURA 4.</b> MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDOS (PORCHER ET AL, 1995). ....	16
<b>FIGURA 5.</b> PRINCIPAIS LITOTIPOS E INDÍCIOS DE MINERALIZAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDOS. A: SERPENTINITO CRENUADO. B: FOLIAÇÃO VERTICAL. C: FRAGMENTOS DE VEIO DE QUARTZO INTENSAMENTE FRATURADO. D: PEGMATITO DE QUARTZO LEITOSO. ....	19
<b>FIGURA 6.</b> OS ELEMENTOS DO CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA, ONDE: $F_e$ = VETOR DO CAMPO TOTAL, $H_e$ = COMPONENTE HORIZONTAL, $Z_e$ = COMPONENTE VERTICAL, $D$ = DECLINAÇÃO, E $I$ = INCLINAÇÃO. (KEAREY ET AL, 2002) .....	25
<b>FIGURA 7.</b> AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO. ....	31
<b>FIGURA 8.</b> LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS. ....	32
<b>FIGURA 9.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO DE INTENSIDADE DO CAMPO TOTAL. ....	36
<b>FIGURA 10.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO DE INTENSIDADE DO CAMPO TOTAL REDUZIDO O IGRF.....	37
<b>FIGURA 11.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO DE REDUÇÃO AO PÓLO.....	38
<b>FIGURA 12.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO DE INTENSIDADE DO SINAL ANALÍTICO. ....	39
<b>FIGURA 13.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO REGIONAL.....	40
<b>FIGURA 14.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO RESIDUAL. ....	41
<b>FIGURA 15.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO DE CONTINUAÇÃO PARA CIMA - 25 METROS. ....	42
<b>FIGURA 16.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO DE CONTINUAÇÃO PARA CIMA - 50 METROS. ....	43
<b>FIGURA 17.</b> MAPA MAGNETOMÉTRICO DE CONTINUAÇÃO PARA CIMA - 100 METROS. ...	44
<b>FIGURA 18.</b> IMAGENS OBTIDAS EM CAMPO COM AS ROCHAS RELACIONADAS A CADA DOMÍNIO MAGNÉTICO. ....	45

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS .....	7
2.	OBJETIVOS .....	9
3.	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS .....	10
4.	CONTEXTO GEOLÓGICO .....	11
4.1.	Contexto Geológico Regional .....	11
4.2.	Evolução Estrutural do Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico .....	13
4.3.	Contexto Geológico Local .....	15
5.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
5.1.	Método Magnetométrico .....	20
5.1.1.	Campo Magnético .....	20
5.1.2.	Propriedades Magnéticas dos Materiais .....	21
5.1.3.	Propriedades Magnéticas das Rochas .....	23
5.1.4.	Campo Magnético da Terra .....	24
5.1.4.1.	O Campo Principal .....	24
5.1.4.2.	Campo Externo .....	26
5.1.4.3.	Anomalias Magnéticas Locais .....	26
5.1.5.	Levantamento Magnetométrico .....	27
5.1.6.	Correções e Processamento de Dados Magnetométricos .....	27
5.1.6.1.	Correção da Variação Diurna .....	27
5.1.6.2.	Remoção do Campo Regional (IGRF) .....	28
5.1.6.3.	Redução ao Pólo .....	29
5.1.6.4.	Sinal Analítico .....	29
5.1.6.5.	Continuação para Cima .....	30
5.1.7.	Interpretação de Anomalias Magnéticas e suas Aplicações .....	30
6.	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO .....	31
6.1.	Aquisição de Dados em Campo .....	31
6.2.	Processamento dos Dados .....	33
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	35
7.1.	Apresentação e discussão dos resultados .....	35
7.2.	Relações entre mapas magnetométricos e ocorrências mineralizadas em cromo .....	46
8.	CONCLUSÕES .....	48
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Uma jazida mineral é formada pelo minério, envolvido por partes estéreis correspondentes às rochas encaixantes. O minério consiste num mineral economicamente aproveitável, enquanto que minerais sem nenhum valor comercial são denominados ganga (PEREIRA, 2003).

A mineração é um termo que abrange os processos, atividades e indústrias que tem por objetivo a extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais. Como atividade industrial, a mineração é indispensável para a manutenção e desenvolvimento econômico e tecnológico (ARNDT & GANINO, 2012).

Desde os primórdios da busca, pelo homem, dos recursos minerais de interesse, são feitas observações a respeito das relações entre certos tipos de mineralizações e determinados tipos litológicos. A partir disso foi estabelecida uma série de associações entre litologias e mineralizações tais como: granito e cassiterita; rochas ultrabásicas e cromita. Contudo, nem todos os granitos apresentam mineralizados em estanho, e que nem todas as rochas ultrabásicas demonstram depósitos de cromita (PEREIRA, 2003; MOON *et al.*, 2006)

A cromita é usada tanto como mineral metálico quanto não metálico, sendo considerado um dos mais importantes minerais industriais em todo o mundo. Os minérios de cromita são empregados como fonte de cromo para as indústrias metalúrgicas, química, de refratários e como areia nos processos de fundição. A indústria metalúrgica desponta como o maior consumidor dos produtos de cromita, comparada às demais (CHATTERJEE, 2007).

O cromo é o quinto elemento metálico de maior consumo industrial. As maiores reservas mundiais de cromita estão assim distribuídas: Cazaquistão (26,1%), África do Sul (15%), Índia (3,2%) e outros países (59%). O total das reservas brasileiras é de 15 milhões de toneladas, que equivale a 4,992 mil toneladas de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  contido, distribuídas entre os estados: Bahia (79,7%), nos municípios de Campo Formoso, Andorinha, Uauá e Santa Cruz; Amapá (7,2%), no município de Mazagão; Minas Gerais (3,1%), no município de Alvorada de Minas (DNPM, 2014).

Estudos de prospecção e pesquisa mineral são fundamentais para o reconhecimento e incorporação de novas reservas, em atendimento a uma demanda crescente tanto para o mercado interno, quanto para exportação e equilíbrio da balança comercial. As ferramentas disponíveis compreendem métodos diretos (sondagem,

amostragens de solo e rocha, análises químicas) e indiretos (análise de sensores remotos, métodos geofísicos) (DENTITH & MUDGE, 2014).

Os métodos geofísicos permitem levantamentos com rapidez e baixo custo em estudos geológicos, embora sob incertezas e ambigüidades relativamente maiores. Esta ferramenta possibilita detectar e delinear feições e estruturas de potencial interesse em subsuperfície, sem, contudo, uma definição precisa da composição ou teores. Os métodos geofísicos são altamente aplicáveis em exploração mineral, 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 (TELFORD *et al*, 1990).

Dentre os diversos métodos geofísicos existentes, os métodos potenciais (Magnetometria e Gravimetria) possuem grande aplicação em pesquisa mineral. A aplicação de métodos potenciais possibilita a caracterização de depósitos minerais a partir de anomalias em parâmetros físicos como suscetibilidade magnética e densidade, devido ao contraste frequentemente apresentado entre a rocha encaixante e o corpo mineralizado.

O método da Magnetometria possui aplicação nas pesquisas em rochas básicas-ultrabásicas devido ao elevado teor de magnetita presente, freqüentemente contrastante em relação as rochas ao redor. Este método apresenta rapidez, versatilidade e baixo custo em diversos tipos de investigação. São utilizados em diversas situações como: prospecção mineral, investigações geotécnicas e arqueológicas, investigações regionais de feições crustais de grande escala, sendo também um auxiliar muito útil para o mapeamento geológico (KEAREY *et al*, 2002).

Este trabalho consiste na aplicação do método geofísico da magnetometria em uma área que ocorrem rochas ultramáficas mineralizadas em cromo, os indícios de mineralização foram obtidos por meio de análises geoquímicas em sedimentos de corrente e análise de amostras de rocha. Está localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, dentro dos limites do município de São Sepé. O local de estudo é de fácil acesso, por estradas de terra, porém carece de estudos anteriores pelo método da Magnetometria.

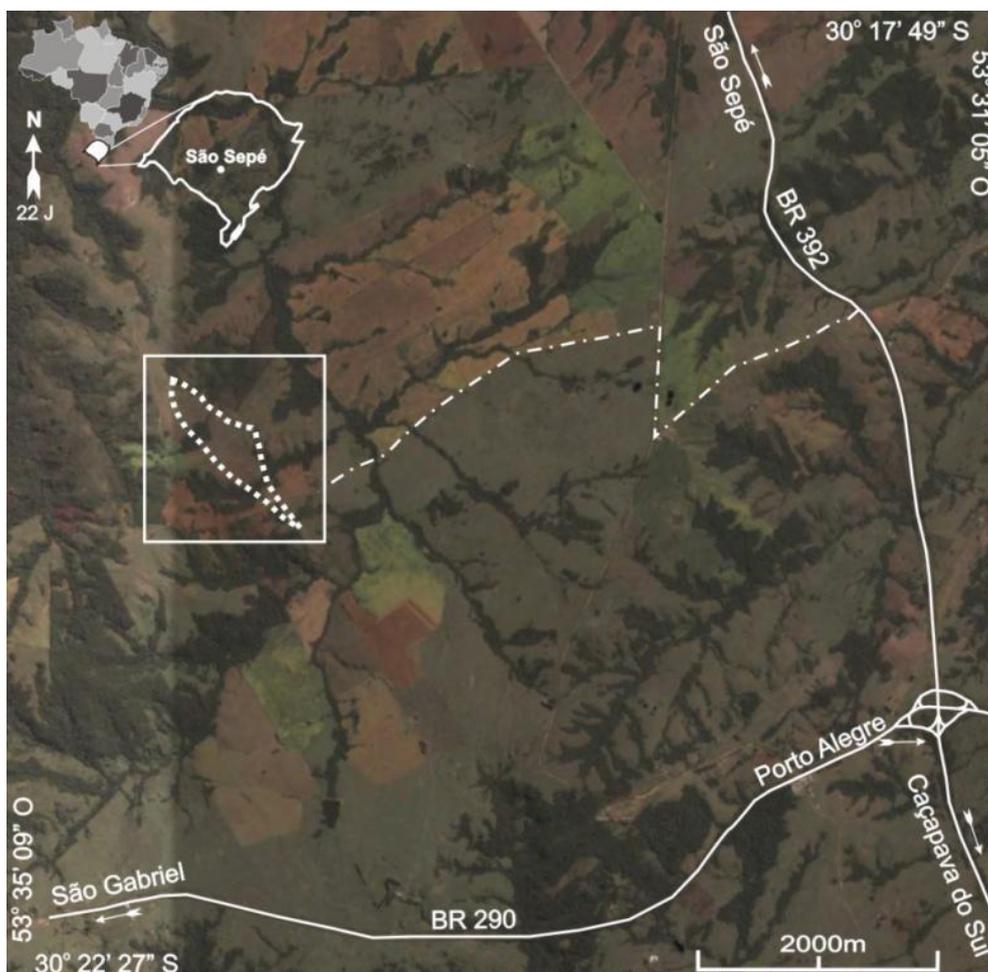
## **2. OBJETIVOS**

Analisar a aplicabilidade da magnetometria na identificação de zonas mineralizadas em cromita/ferro-cromita, contida numa sequência metaultramáfica previamente classificada como uma ocorrência mineral de cromo por prospecção geoquímica.

Avaliar diversos produtos de processamento magnetométrico sob a ótica da evolução tectônica, que submeteu o depósito a diversas fases de deformação, na busca do produto que apresente a maior proximidade com a realidade geológica da área de estudos.

### 3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos está localizada na zona rural do município de São Sepé (RS), distante 7 km do viaduto no entroncamento entre a BR392 e a BR290. O acesso à área é possível por estradas secundárias de terra (Figura 1).



**Figura 1.** Localização da área de estudos.

Estudos sistemáticos semi-regionais em escala 1:50.000 foram realizados na área, representados por prospecção geoquímica em sedimentos de corrente e amostras de rocha, além de estudos geofísicos terrestres e aéreos, reunidos no Programa de Levantamentos Básicos Geológicos (PLBG) folha Passo do Salsinho (SH.22-Y-A-I-4). Este estudo possibilitou o reconhecimento de mineralizações de cromita podiforme associadas aos corpos máficos/ultramáficos presentes na região. Na área de estudo foram identificados teores geoquímicos que permitem classificar esta como uma ocorrência mineral de cromo (PORCHER *et al*, 1995).

## 4. CONTEXTO GEOLÓGICO

### 4.1. Contexto Geológico Regional

No continente Gondwana, o estado do Rio Grande do Sul apresentava continuidade física com o sudoeste da África. As rochas ultramáficas do Estado são contidas no Escudo Sul-Riograndense (ESRG), exceto por soleiras de diques basálticos mesozóicos da Serra Geral (HARTMANN, 2000).

Segundo Soliani Jr. (1986) e Fragoso-César (1991), o ESRG apresenta rochas ígneas, metamórficas e sedimentares pré-paleozóicas, cuja gênese está ligada aos ciclos Transamazônico (Paleoproterozóico) e Brasileiro/Pan-Africano (Neoproterozóico). Ao longo do Neoproterozóico (900 – 500 Ma), esta área configurou-se como importante zona de acreção e retrabalhamento crustal, correspondendo ao chamado Cinturão Dom Feliciano. O ESRG abrange uma superfície de 65.000 km<sup>2</sup> notabilizado em termos de geologia pré-cambriana do Brasil pela grande variedade de associações petrotectônicas em uma área de dimensões reduzidas (CHEMALE, 2000). O ESRG pode ser dividido em quatro unidades geotectônicas principais (Figura 2):

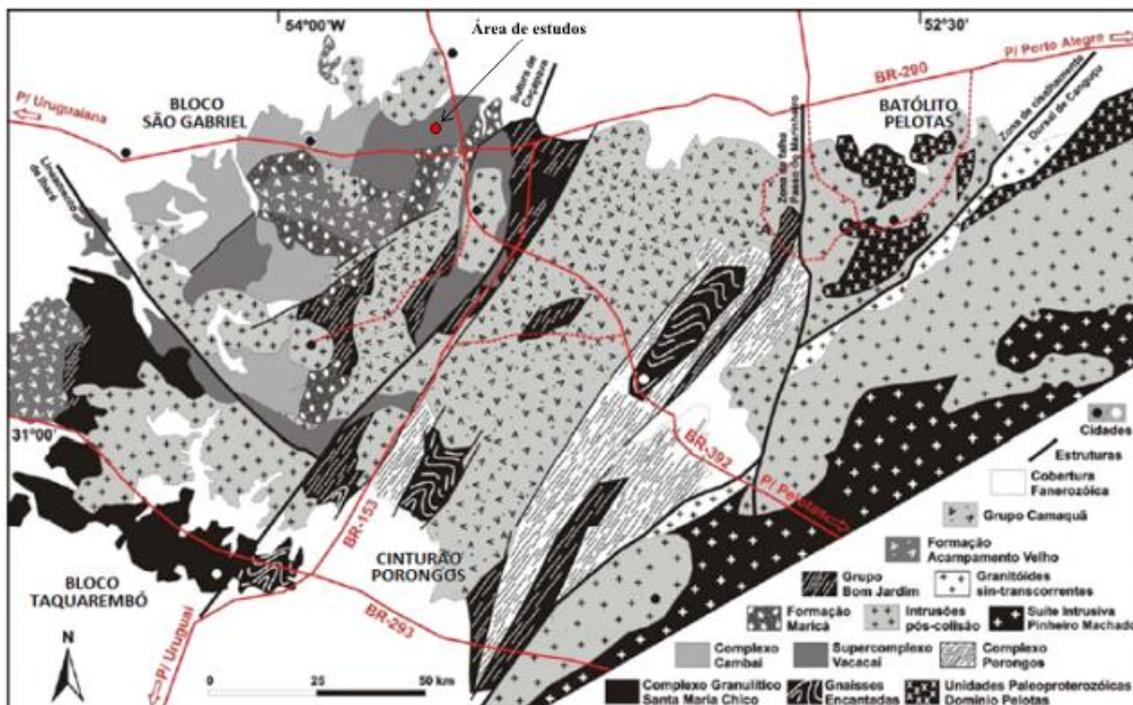
1 – Batólito Pelotas, que corresponde ao longo da costa e a oeste da planície costeira quaternária, é essencialmente formado por granito-gnáissico-migmatítico e contém pequeno volume de rochas ultramáficas, concentradas nos septos de embasamento.

2 – Cinturão Porongos, situado a oeste do batólito, é predominantemente formado por xistos terrígenos e vulcânicas ácidas, contendo no seu interior gnaisses tonalíticos e graníticos.

3 – Bloco São Gabriel, localizado à noroeste do escudo, contém o maior volume de rochas ultramáficas do escudo, incluindo a maior unidade, que é o Ofiolito Cerro Mantiqueiras. Ultramafitos metamórficos são frequentes, apesar de restritos, em todas as unidades estratigráficas do bloco.

4 – Bloco Taquarembó, corresponde a parte sudoeste do escudo, apresenta rochas ultramáficas de fácies granulito, principalmente piroxenitos, mas também uma lente de espinélio ilherzolito, que é muito importante para a definição das condições de metamorfismo (HARTMANN & REMUS, 2000).

As litologias envolvidas neste trabalho estão situadas dentro do Bloco São Gabriel.

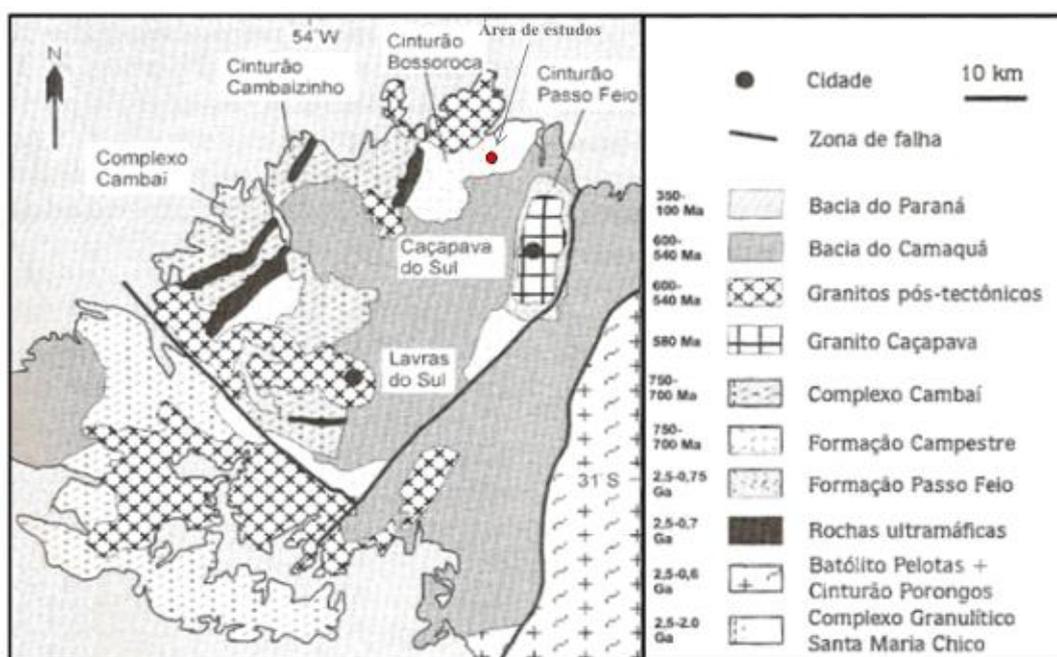


**Figura 2.** Mapa geológico esquemático do Escudo Sul-Riograndense, detalhando as quatro unidades tectônicas principais (Batólito Pelotas, Cinturão Porongos, Bloco São Gabriel, Bloco Taquarembó), e as descontinuidades que os delimitam (BORBA, 2006).

O Bloco São Gabriel ocorre na parte NW do escudo, constituído por vários cinturões metamórficos de origem diversificada. As associações petrotectônicas pré-Maricá deste bloco ocorrem na forma de faixas lineares e alongadas segundo a direção NE e infletem para NW na parte sul.

As lineações de estiramento com orientação NE e caimento subhorizontal predominam ao longo de todas as sequências metamórficas do Bloco São Gabriel. Apresenta um evento de cavalgamento de idade entre 700 Ma e 600 Ma. O limite superior é sugerido pela idade dos gnaisses do Complexo Cambaí e pela datação do metamorfismo nos andesitos da Formação Bossoroca em 700 Ma, o limite inferior corresponde à intrusão do Granito Lavras do Sul. Um evento transcorrente está assinalado pela intrusão do Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS) há  $550 \pm 10$  Ma, que marca a recorrência de movimentações transcorrentes, tendo em vista as diversas feições estruturais sugestivas de reativação das falhas transcorrentes dextrais nesta região do escudo (NARDI & BITENCOURT, 1989).

A partir de Caçapava do Sul em direção a São Gabriel (leste para oeste), ocorrem as seguintes unidades (Figura 3): Complexo Passo Feio, composto pelas Formações Passo Feio Sul e Norte e os Gnaisses Neto Rodrigues; Cinturão Bossoroca, constituído pelas Sequências Vila Nova, Passinho e Cerro Mantiqueiras; e Cinturão Cambaizinho, constituído pelas Formações Cambaizinho e Cerro do Ouro (HARTMANN & REMUS, 2000).



**Figura 3.** Mapa geológico do Bloco São Gabriel (HARTMANN & REMUS, 2000).

#### 4.2. Evolução Estrutural do Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico

A unidade mais antiga está representada pelo Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico, para o qual é adotada uma idade de 2,2 Ga. Esta idade, porém, deve ser a mínima para a unidade, tendo em conta que as datações K-Ar disponíveis devem refletir o evento metamórfico que afetou esses litotipos.

As estruturas ígneas primárias preservadas nas rochas desse complexo, bem como sua caracterização petrográfica e litoquímica, são condizentes com as apresentadas por complexos acamadados gerados por processos cumuláticos em ambiente de crosta estabilizada e evoluída no tempo. Dados estruturais e geocronológicos sugerem que o Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico tenha um posicionamento autóctone e constitua uma intrusão em um embasamento não exposto na área, possivelmente por estar coberto pelas unidades metamórficas mais jovens.

A impossibilidade de estabelecer a relação dos corpos básicos ultrabásicos com seu embasamento não permite caracterizar a ambiência geológica em que ocorreram essas intrusões. Não obstante, é sugerido que, pelo menos a porção ocidental do ESRG tenha sido palco de uma orogênese Transamazônica, refletida pelo evento metamórfico que afetou o Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico em 2,2 Ga.

Aparentemente a região não foi afetada por eventos tectônicos significativos no intervalo entre o Proterozóico Inferior e o início do Proterozóico Superior, tendo se comportado como uma plataforma estável.

As características geológicas, estruturais e litoquímicas apresentadas pelas associações metamórficas alóctones evidenciam que a partir do início do Proterozóico Superior, um novo período de instabilidade tectônica tenha se instalado na região. Este novo ciclo, iniciado por um evento distensivo, teria dado origem a uma bacia, com provável evolução para um protooceano e consequente geração de crosta oceânica, representada pelos termos serpentíníticos do Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico, os quais são quimicamente compatíveis com associações relacionadas a complexos alpinos.

Feições estruturais marcadas nas rochas do Complexo Metamórfico Vacacai sugerem a caracterização de uma evolução tectônica em que podem ser distintas quatro fases de deformação. As três primeiras (D1, D2 e D3) geraram dobras com tendência a coaxialidade com *trend* axial NE-SW, e estão relacionadas a esforços compressivos dirigidos para SE, sendo que D1 e D2 refletem uma movimentação tangencial, enquanto D3 é caracterizada como associada a uma fase de transcorrência. A fase D4, que gerou dobras com orientação axial NW-SE, resultou de uma drástica reorientação no regime de *strain* global do ESRG (PORCHER *et al*, 1995).

**Fase de Deformação D1:** responsável pelo dobramento e transposição do acamadamento das unidades Metavulcanoclástica e Metapelítica que constituem o Complexo Metamórfico Vacacai. Os dobramentos F1 estão representados por pequenas dobras isoclinais sem raiz, de dimensões milimétricas a centimétricas. No Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico, com elevadas taxas de deformação nas fases D2 e D3 com obliteração das estruturas pretéritas, apenas em raros locais foi observada uma foliação metamórfica de atitude compatível com a foliação S1.

**Fase de Deformação D2:** esta fase resultou em um expressivo transporte de massas de noroeste para sudeste, evidenciado pelos imbricamentos tectônicos que caracterizam o arranjo estrutural entre as diversas associações metamórficas. A forma e

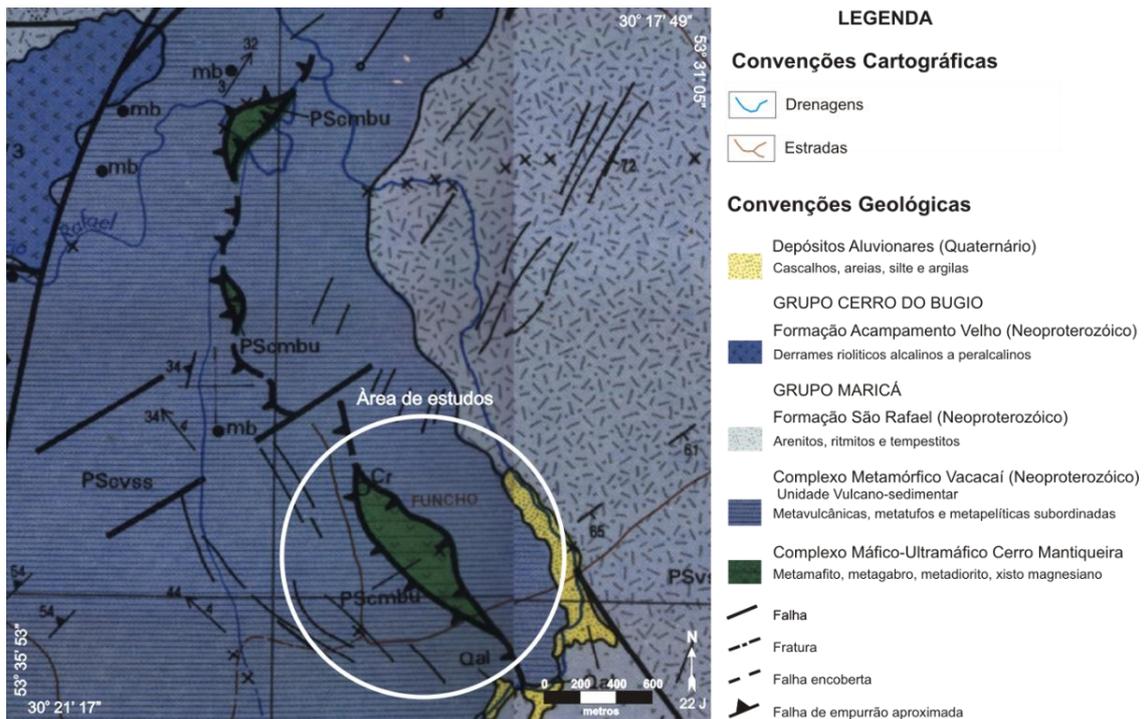
disposição dos corpos do Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico apresentam um caráter alóctone, com intenso desenvolvimento de clivagens de fratura de baixo ângulo. As superfícies S2, em função da variação da intensidade de deformação e da competência das litologias envolvidas, variam de clivagens de fratura até clivagens de crenulação que em alguns locais evoluíram para planos de cisalhamento com desenvolvimento de microcavalgamentos.

**Fase de Deformação D3:** é responsável pelo redobramento coaxial das estruturas F1 e F2, com geração de dobras do tipo normal, com eixos de caimento moderado, ora para NNE, ora para SW. São dobras abertas, frequentemente de tendência monoclinal, com os flancos inclinados mergulhando para NW. Como consequência desta fase de deformação, materializou uma nova superfície de partição representada predominantemente por clivagens de fratura com orientação NE-SW e mergulhos fortes, ora para NW, ora para SE. Em zonas de elevada taxa de deformação, a superfície S3 evoluiu para uma foliação milonítica. Esta foliação intercepta parcialmente a totalidade, as feições estruturais relacionadas às fases de deformação anteriores.

**Fase de Deformação D4:** as dobras geradas nesta fase se caracterizam por apresentarem eixos com orientação próxima da ortogonalidade em relação às estruturas estabelecidas nas fases anteriores. São dobras suaves, de dimensões decimétricas, representadas por ondulações da foliação metamórfica, constituindo dobras de flanco, ou seja, dobramentos superimpostos aos limbos das estruturas das fases anteriores, com o caimento dos eixos B4 acompanhando o mergulho da foliação metamórfica, para NW, a superposição das dobras F4 às dobras F3 gerou figuras de interferência do tipo “domo e bacia”. A superfície axial de F4 é representada por clivagens de fratura, de espaçamento decimétrico a centimétrico. Em zonas de menor *strain*, essa superfície axial se comporta como uma clivagem de fratura muito cerrada, transpondo e obliterando as foliações metamórficas pretéritas.

### **4.3. Contexto Geológico Local**

A sequência metaultramáfica em estudo é limitada por rochas reunidas no Complexo Metamórfico Básico-ultrabásico, Complexo Metamórfico Vacacaí e coberturas vulcanossedimentares representadas pelo Grupo Maricá, unidades da Bacia Sedimentar do Camaquã (Figura 4).



**Figura 4.** Mapa geológico da área de estudos (PORCHER *et al*, 1995).

O Complexo Metamórfico Vacacaí, unidade vulcanossedimentar é constituído predominantemente por rochas pelíticas com ocorrências subordinadas de estreitos níveis de arenitos inconsolidados e, esporadicamente, de rochas ortoderivadas. A escassez de afloramentos e a superposição de uma foliação milonítica, que transpõe as feições primárias e as feições deformacionais pretéritas, impedem a caracterização do relacionamento entre os litótipos metassedimentares e os ortoderivados (PORCHER *et al*, 1995).

As rochas metapelíticas apresentam coloração cinza-escuro a cinza-esverdeado, mostrando em alguns afloramentos um bandamento milimétrico, dado pela alternância de bandas claras e escuras.

As rochas carbonáticas associadas às litologias metapelíticas, estão representadas por lentes de mármore, de granulometria fina a média, constituídas quase que exclusivamente de carbonato (>90%), com presença subordinada de talco e clorita, esta de ocorrência intersticial ao longo dos contatos entre os grãos de carbonato. Em algumas amostras ocorrem raros cristais de tremolita.

As rochas metapelíticas em contato com o Complexo Granítico Caçapava do Sul, ou constituindo xenólitos no corpo granítico, estão representados por granada-mica-quartzo xistos.

O grau metamórfico mais elevado ( fácies xisto-verde superior, zona da granada), que atinge estas litologias, sugere a ação de calor proveniente da intrusão granítica sobre os metapelitos de baixo grau ( fácies xisto-verde inferior, zona da clorita) (PORCHER *et al*, 1995).

O Grupo Maricá apresenta litótipos sedimentares siliciclásticos depositados em ambiente costeiro, com indícios de eventos progradacionais e retrogradacionais. A porção basal é representada por ortoconglomerados e arcóseo grosso, reunidos na Sequência Sedimentar Cerro Chato.

Esta sequência é sucedida por arenitos e lentes conglomeráticas de planície fluvial de canais entrelaçados, reunidos na Formação Passo da Promessa. Esta Formação é sucedida por arenitos e ritmitos de plataforma marinha rasa, agrupados na Formação São Rafael. Um novo sistema de planície fluvial com arenitos e lentes conglomeráticas sobrepõe a Formação São Rafael e configura uma nova unidade sedimentar, denominada Formação Arroio América (CPRM, 2008).

As rochas que a constituem estão distribuídas principalmente na porção sudeste da folha, estendido segundo uma faixa alongada de direção norte-nordeste, com largura variável entre 5 km e 11 km, até as proximidades da rodovia BR-290. A partir daí, as litologias da sequência são interrompidas por um “alto” do embasamento metamórfico, voltando a aflorar na porção nordeste da folha, em estreitas faixas de direção nordeste-sudeste, com larguras que variam de 1 km a 2 km.

Essa unidade sobrepõe litótipos do Complexo Gnáissico e do Cinturão Metavulcanossedimentar em discordância angular sendo, por sua vez, recoberta em discordância erosiva por rochas das sequências vulcanossedimentares mais jovens.

A unidade mais representativa do Grupo Maricá na área de estudos são os litótipos pertencentes à Formação São Rafael. Esta unidade é composta por arcóseos (finos a médios, eventualmente grosseiros), pelitos e, subordinadamente, conglomerados, constituindo quatro litofácies: arenitos sigmoidais, arenitos e pelitos tabulares, arenitos com estratificação cruzada acanalada, e conglomerados.

Seus contatos com as unidades superiores e inferiores são transicionais, e entre as litofácies que a compõe são interdigitados, não erosivos ou, eventualmente, erosivos. Arenitos sigmoidais são litofácies predominantes, sendo constituída por espessos pacotes de arcóseos, com cores que variam do cinza-esverdeado ao cinza-róseo até o avermelhado (PORCHER *et al*, 1995).

As rochas do Complexo Metamórfico Básico-Ultrabásico são caracterizadas por três conjuntos distintos representados por: rochas gabróicas e basálticas; rochas serpentínicas; e uma associação metassomática. No Complexo Metamórfico Vacacaí foram feitas associações de rochas metassedimentares, metaígneas básicas e ácidas, metaultramáficas e complexos máfico-ultramáficos de caráter estratiforme da porção ocidental do Escudo Sul-Rio-Grandense.

No que diz respeito à evolução geotectônica das associações metamórficas de natureza básica-ultrabásica, ora consideradas como faixas ofiolíticas, ora como parte constituinte de cinturões vulcanossedimentares tipo *greenstone belt*. Na área investigada, as rochas do Complexo Básico-Ultrabásico estão, invariavelmente, em contato com as rochas do Cinturão Metavulcanossedimentar (PORCHER *et al*, 1995).

As paragênes minerais associadas aos aspectos texturais observados evidenciam que as rochas do Complexo Básico Ultrabásico foram submetidas a processos metamórficos que alcançaram a fácies xisto verde superior a anfibolito. Nas rochas ultrabásicas do complexo, os aspectos metamórficos envolvem reações de desequilíbrio, com a transformação do piroxênio magmático para anfibólios do tipo cumingtonita e antofilita. A ocorrência de antofilita é comum em terrenos anfibolíticos de baixa pressão, enquanto a cumingtonita é uma fase mineral normal em anfibolitos derivados de metamorfismo regional sobre rochas ígneas básicas. Não se afasta a possibilidade de que os processos metamórficos sobre o Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico tenham atingido uma fácies mais elevada tendo em vista a abundante presença de cumingtonita e hornblenda verde na paragênese metamórfica (PORCHER *et al*, 1995).

Localmente foram reconhecidas diversas exposições de serpentinito, com graus de alteração variáveis, caracterizado por xistosidade bastante evidente devido a grande quantidade de anfibólios e micas. Os locais mais preservados apresentam colocação cinza a verde escuro, sedoso ao toque e com dobramentos e fraturamento variável (Figura 5A e 5B).

Também foram reconhecidos locais em que o serpentinito é cruzado por veios de quartzo leitoso, com graus de fraturamento variáveis, alojados em fraturas verticais e que cruzam a foliação da rocha encaixante (Figura 5C). Em um ponto no centro da área, foi reconhecido um pegmatito com aproximadamente 1,5 metros de altura por 3 metros de comprimento, com formato lenticular e ausente de foliação e minerais acessórios (Figura 5D).



**Figura 5.** Principais litotipos e indícios de mineralização na área de estudos. A: serpentinito crenulado. B: Serpentinito com foliação vertical. C: Fragmentos de veio de quartzo intensamente fraturado. D: Matacão de quartzo leitoso.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. Método Magnetométrico

Este método é tradicionalmente empregado em pesquisa mineral para identificação de estruturas ou rochas com contraste de propriedades magnéticas, e mais raramente no detalhamento de ocorrências minerais. Sua importância no presente estudo é justificada pelo grande contraste de propriedades entre ocorrências e cromita/ferrocromita e a sequencia metaultramáfica, além do contraste destas com as unidades metassedimentares e sedimentares adjacentes.

#### 5.1.1. Campo Magnético

O campo magnético surge pelo fluxo magnético entre dois pólos ou cargas elétricas. A força exercida entre dois pólos magnéticos de intensidade  $m_1$  e  $m_2$ , separados por uma distancia  $r$  é determinada por.

$$F = \frac{\mu_0 m_1 m_2}{4\pi\mu_R r^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $\mu_0$  e  $\mu_R$  são constantes que correspondem à permeabilidade magnética do vácuo e à permeabilidade magnética relativa do meio entre os pólos; quando estes apresentam cargas de sinais diferentes a força magnética é atrativa, e repulsiva quando apresentarem cargas de mesmo sinal.

O campo magnético  $B$  gerado por um pólo de intensidade  $m$  a uma distancia  $r$  do pólo é definido como a força exercida sobre uma unidade de pólo positiva naquele ponto, sendo assim:

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_R r^2} \quad (\text{Equação 2})$$

A intensidade de magnetização é denotada como  $H$ , no sistema internacional (SI) de unidades é expresso em  $A\ m^{-1}$ . A densidade do fluxo magnético, medida sobre uma área perpendicular à direção de fluxo, é conhecida como indução magnética ou campo magnético  $B$ , sendo este proporcional a  $H$ . A lei de indução de Lenz relaciona a taxa de variação do fluxo magnético em um circuito à tensão a esse associada, de forma que  $B$  é expresso em  $V\ s\ m^{-2}$  [Weber (Wb)  $m^{-2}$ ]. A unidade  $Wb\ m^{-2}$  é mais conhecida como tesla (T).

A constante  $\mu$  caracterizada como permeabilidade magnética é expressa em  $\text{Wb A}^{-1} \text{m}^{-1}$  ou Henry (H)  $\text{m}^{-1}$ .

O tesla é uma unidade muito grande para expressar as pequenas anomalias magnéticas geradas pelas rochas, por isso se utiliza o nanotesla (nT), que equivale a  $10^{-9}$  T (KEAREY *et al*, 2002).

Quando um corpo está sob influência de um campo magnético externo, esse pode adquirir uma magnetização na direção deste campo, que é perdida quando o mesmo é retirado deste campo, este fenômeno é conhecido como magnetização induzida  $M$  ou polarização magnética, resultando no alinhamento dos dipolos elementares.

A intensidade induzida de magnetização é proporcional à intensidade da força de magnetização  $H$  do campo induzido, sendo assim:

$$M = kH \quad (\text{Equação 3})$$

O fator de proporcionalidade  $k$  é uma propriedade física do material, chamado de suscetibilidade magnética. É uma medida da facilidade com que o material pode ser magnetizado. Devido  $M$  e  $H$  apresentarem as mesmas unidades ( $\text{Am}^{-1}$ ),  $k$  é uma quantidade adimensional. A suscetibilidade da maioria dos materiais é dependente da temperatura e, em alguns materiais (ferromagnéticos e ferrimagnéticos)  $k$  depende de  $H$  (LOWRIE, 2007).

### 5.1.2. Propriedades Magnéticas dos Materiais

O comportamento magnético de um sólido depende do momento magnético dos átomos ou íons que ele contém. Momentos magnéticos atômicos e iônicos são proporcionais ao momento angular quantizado associado com o movimento orbital dos elétrons em torno do núcleo e com os spins dos elétrons sobre seu próprio eixo de rotação. A capacidade do material de poder orientar seus momentos magnéticos quando um campo magnético é aplicado sobre ele é conhecido como suscetibilidade magnética. Quando maior a suscetibilidade do material, maior é a intensidade do campo induzido para um mesmo campo aplicado (LOWRIE, 2007).

Com base na suscetibilidade magnética, o comportamento magnético dos materiais varia na forma de: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo.

A compreensão das propriedades magnéticas dos materiais é fundamental num trabalho de pesquisa mineral devido a necessidade de contraste de propriedades físicas

para reconhecimento de zonas mineralizadas. Neste estudo, as zonas mineralizadas são constituídas por acumulações de cromita/ferrocromita, minerais ferromagnéticos, ao passo que os silicatos formadores das rochas sedimentares e metasedimentares são classificados como diamagnéticos. Os minerais formadores da sequência metaultramáfica podem ser classificados como paramagnéticos.

#### **5.1.2.1. Diamagnetismo**

Nos materiais diamagnéticos a suscetibilidade é baixa e negativa, ou seja, a magnetização se desenvolve no sentido oposto ao campo externo aplicado. Átomos diamagnéticos tenderão a zero quando o campo magnético externo for zero, uma situação característica de átomos com camadas completamente preenchida de elétrons (TELFORD *et al*, 1990).

O diamagnetismo é muitas vezes mascarado pelas fortes propriedades paramagnéticas ou ferromagnéticas. A suscetibilidade diamagnética é reversível, e, como é fraca e negativa se torna independente da temperatura. Muitos minerais importantes das rochas pertencem a essa classe, entre eles o quartzo e a calcita. Eles têm suscetibilidades em torno de  $-10^{-6}$  em unidades SI (LOWRIE, 2007).

#### **5.1.2.2. Paramagnetismo**

Os valores de suscetibilidade destes materiais são baixos e positivos, ou seja, a magnetização induzida é proporcional à força do campo aplicado e paralelo à sua direção. A suscetibilidade é reversível, fraca, porém positiva.

Uma característica importante é que a suscetibilidade paramagnética varia inversamente com a temperatura. Exemplos: olivinas, piroxênios, anfibólios (TELFORD *et al*, 1990).

#### **5.1.2.3. Ferromagnetismo**

Nestes materiais o valor da suscetibilidade é alto e positivo, como por exemplo o ferro, o níquel e o cobalto. Os átomos ocupam posições próximas o suficiente para permitir a troca de elétrons entre os átomos vizinhos. A interação de troca produz um campo molecular muito forte dentro do metal, que alinha os momentos magnéticos paralelamente e produz uma magnetização espontânea (MS). Os momentos magnéticos

reagem em uníssono, a um campo magnético, dando origem a uma classe de comportamento magnético forte (LOWRIE, 2007). O ferromagnetismo diminui com o aumento da temperatura e desaparece totalmente na temperatura Curie específica de cada material (Ponto de Curie) (TELFORD *et al*, 1990).

Uma amostra de rocha pode conter milhares de minúsculos grãos de minerais ferromagnéticos. Em fortes campos, a magnetização atinge um valor de saturação (igual ao MS), na qual os momentos magnéticos individuais estão alinhados com o campo aplicado. Se o campo magnetizante é reduzido à zero, um material ferromagnético retém parte da magnetização induzida (LOWRIE, 2007).

Nesta categoria está uma minoria dos minerais formadores das rochas, como os óxidos e sulfetos de ferro.

### **5.1.3. Propriedades Magnéticas das Rochas**

O estudo das propriedades magnéticas das rochas e de seus constituintes minerais são fundamentais para a programação de levantamentos magnetométricos em pesquisa mineral e, principalmente, para a análise e interpretação dos produtos magnetométricos.

A concentração fraca e variável de minerais ferromagnéticos desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades magnéticas das rochas que são importantes tanto para a geologia quanto para geofísica (LOWRIE, 2007). Os fatores mais importantes que influenciam o magnetismo da rocha são o tipo de mineral ferromagnético, o seu tamanho de grão, e a forma que adquiriu a magnetização resultante na rocha após ter sido exposta a um campo magnético externo, denominado magnetização remanescente ou permanente.

O grupo ferro-titânio-oxigênio possui uma série de solução sólida de minerais magnéticos que vai da magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ao ulvoespínélio ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ). O óxido de ferro comum, a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), é antiferromagnético, assim não gera anomalias magnéticas. Do grupo ferro-enxofre ocorre a pirrotita ( $\text{FeS}_{1+k}$ ,  $0 < k < 0,15$ ), cuja a suscetibilidade magnética é dependente de sua composição (KEAREY, 2002).

Embora cada rocha apresente uma característica particular de dispersão de grãos magnéticos e possuam um caráter magnético específico, é razoável classificar o comportamento magnético das rochas de acordo com a média global de magnetita.

As rochas ígneas são, em geral, altamente magnéticas em razão de sua concentração relativamente alta de magnetita. Esta proporção tende a diminuir de acordo com o aumento do teor de sílica, sendo que rochas básicas apresentam maior conteúdo magnético que rochas ácidas.

As rochas metamórficas apresentam variações em seu caráter magnético. Caso a pressão parcial do oxigênio for relativamente baixa, a magnetita é reabsorvida, o ferro e o oxigênio são incorporados em outras fases minerais com o aumento do grau de metamorfismo. Com pressão parcial do oxigênio relativamente alta, pode resultar na formação de magnetita como mineral acessório em reações metamórficas.

As rochas sedimentares geralmente não apresentam uma característica magnética, mas podem apresentar quantidades significativas de magnetita na fração de minerais pesados. Anomalias magnéticas observadas em áreas cobertas por sedimentos são geralmente causadas por um embasamento ígneo ou metamórfico, ou intrusões nos sedimentos (KEAREY *et al*, 2002).

#### **5.1.4. Campo Magnético da Terra**

O campo magnético terrestre é semelhante a um dipolo cujos pólos Norte e Sul magnéticos estão situados a cerca de 75° N, 101° W e 69° S, 145° E. As magnitudes do campo magnético total (Fe) nos pólos norte e sul magnéticos são 60  $\mu\text{T}$  e 70  $\mu\text{T}$ , respectivamente. O valor mínimo,  $\sim 25 \mu\text{T}$ , ocorre no sul do Brasil. A linha de inclinação zero (equador magnético, onde  $Z = 0$ ) nunca é superior a 15° do equador da Terra (TELFORD *et al*, 1990).

O campo geomagnético é geometricamente mais complexo que o campo gravitacional terrestre, pois apresenta uma variação irregular de orientação e magnitude com a latitude, longitude e o tempo (KEAREY *et al*, 2002). A origem do campo magnético na terra é proveniente de três formas: campo principal, campo externo e anomalias magnéticas locais.

##### **5.1.4.1. O Campo Principal**

O campo magnético principal é proveniente de fontes no interior da Terra. Na teoria atual, o campo principal é causado por correntes de convecção de um material condutor composto principalmente de ferro e níquel, este que circula no núcleo líquido externo, que gera um mecanismo semelhante a um dínamo. Deste modo pode-se

considerar a Terra uniformemente magnetizada, assemelhando-se com um dipolo magnético ao longo do seu eixo de rotação (TELFORD *et al*, 1990).

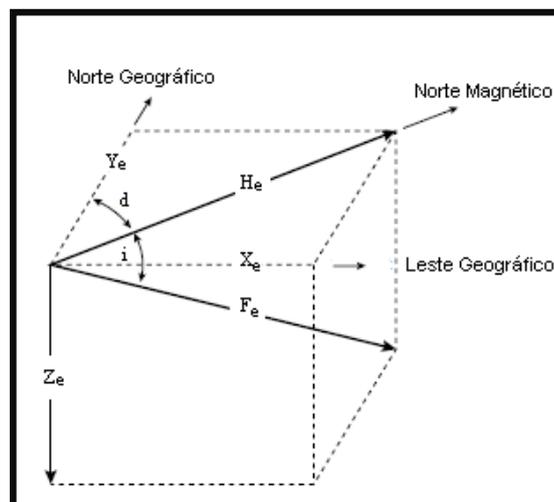
A intensidade do campo magnético total é definida por  $F_e$ , sua inclinação  $i$ , referente ao ângulo que o vetor faz com o plano horizontal, e sua declinação  $d$ , que é o angulo do plano vertical com o norte geográfico, de acordo com a Figura 6.

$F_e$  pode ser resolvido em uma componente  $Z_e$  e uma horizontal  $H_e$ . O plano vertical que contem  $F_e$ ,  $Z_e$  e  $H_e$  é um meridiano magnético.

O campo também pode ser descrito em termos da componente vertical ( $Z_e$ ) e da componente horizontal  $H_e$ , que é sempre positiva, assim como  $X_e$  para o norte geográfico e  $Y_e$  para o leste geográfico (TELFORD *et al*, 1990). Estes elementos são relacionados da seguinte forma:

$$\left. \begin{aligned} F_e^2 &= H_e^2 + Z_e^2 = X_e^2 + Y_e^2 + Z_e^2 \\ H_e &= F_e \cos I & Z_e &= F_e \sin I \\ X_e &= H_e \cos D & Y_e &= H_e \sin D \\ \tan D &= \frac{Y_e}{X_e} & \tan I &= \frac{Z_e}{H_e} \\ F_e &= F_e f_1 = F_e (\cos D \cos I i + \sin D \cos I j + \sin I k) \end{aligned} \right\} \text{(Equação 4)}$$

Estes sete elementos geomagnéticos estão inter-relacionados de diversas formas, onde quaisquer três elementos são suficientes para determinar os quatro restantes (Figura 6) (BURGER, 2006).



**Figura 6.** Os elementos do campo magnético da terra, onde:  $F_e$  = vetor do campo total,  $H_e$  = componente horizontal,  $Z_e$  = componente vertical,  $d$  = declinação, e  $i$  = inclinação. (KEAREY *et al*, 2002)

#### **5.1.4.2. Campo Externo**

A maior parte das pequenas porções remanescentes do campo geomagnético pode estar associada com as correntes elétricas nas camadas ionizadas da atmosfera superior. As variações temporais desta porção são muito mais rápidas do que o campo principal. Alguns efeitos relacionados a isto são:

- Variação das atividades das manchas solares em um ciclo de 11 anos de duração;
- Variação diurna solar no período de 24 horas, da ordem de 30 nT, que variam com a latitude e a estação do ano. Esta variação é controlada provavelmente pela ação do vento solar e correntes na ionosfera;
- Variação lunar no período de 25 h, com amplitudes de até 2 nT, que variam ciclicamente ao longo do mês, e que pode estar associada a interação ionosfera-lua;
- Tempestades magnéticas correlacionadas com atividade solar em intervalos de 27 dias, que provocam distúrbios transientes ocasionando amplitudes com valores acima de 1 nT na maioria das latitudes, mais drástica nas regiões polares, onde é associado com a aurora.

Na prospecção magnética as variações diurnas podem ser corrigidas com o uso de magnetômetros na estação base, exceto em uma ocasional tempestade magnética (TELFORD *et al*, 1990).

#### **5.1.4.3. Anomalias Magnéticas Locais**

Mudanças locais do campo geomagnético são resultados de variações de minerais magnéticos contidos em rochas presentes na crosta terrestre. Estas anomalias ocasionalmente são grandes o suficiente para dobrar o valor do campo magnético principal. Geralmente não atingem grandes distâncias, não apresentando caráter regional, sendo estas anomalias locais, o alvo da prospecção geofísica magnética.

As fontes de anomalias magnéticas locais não podem ser muito profundas, devido a temperaturas abaixo de 40 km de profundidade serem acima do ponto de Curie, a temperatura a qual as rochas perdem suas propriedades magnéticas ( $\approx 550$  °C). Deste modo as anomalias locais devem estar associadas a características da crosta superior (TELFORD *et al*, 1990).

### **5.1.5. Levantamento Magnetométrico**

Nos levantamentos magnéticos terrestres, normalmente são utilizados dois magnetômetros, o primeiro é fixado numa base, e o segundo é móvel, que permite a realização do levantamento; é importante que o magnetômetro base fique fixado em um local onde não haja valores magnéticos anômalos, somente o campo magnético ambiente (TELFORD *et al*, 1990).

As leituras não devem ser feitas nas proximidades de objetos metálicos que possam perturbar o campo magnético local, e os operadores dos magnetômetros não devem carregar objetos metálicos. Para os magnetômetros *fluxgate* e de prótons não é necessário realizar leituras numa estação base, porque não apresentam deriva, embora seja aconselhável o uso de estação base para monitoramento da variação diurna (KEAREY *et al*, 2002).

### **5.1.6. Correções e Processamento de Dados Magnetométricos**

Após a aquisição de dados obtidos em um levantamento magnético, é necessário remover todas as causas de variação magnética que não tenham relação com os efeitos magnéticos da subsuperfície, para isto são aplicadas algumas correções e em muitos casos é preciso realizar um processamento ou transformações do campo magnético que antecede e facilita a fase de interpretação (KONZEN, 2002).

#### **5.1.6.1. Correção da Variação Diurna**

As variações diurnas são pequenas oscilações sofridas pelo campo magnético ao longo do dia, e sua origem está relacionada com correntes elétricas na ionosfera controladas pela atividade solar. Essa atividade tem início por volta das 9h 00min, com um pico ao meio dia (exposição máxima), cessando no final da tarde, entre as 16h 00min e 17h 00min, quando o campo magnético volta ao normal. Estas variações são mais intensas conforme aproxima-se do equador e mais suaves nos pólos (SOUZA, 2006).

Para corrigir a variação diurna, pode ser utilizado um método no qual o magnetômetro é reocupado durante o dia, numa estação base fixa. As diferenças observadas nas leituras da base são distribuídas entre as leituras nas estações ocupadas durante o dia, de acordo com o horário de observação (KEAREY *et al*, 2002).

Uma maneira prática é colocar um magnetômetro de gravação contínua em uma estação base, e realizar o levantamento com magnetômetro móvel, retornando à base no final do dia. As correções consistem simplesmente em ajustar a leitura do campo com as flutuações observadas no magnetômetro da estação base (BURGER, 2006).

#### **5.1.6.2. Remoção do Campo Regional (IGRF)**

As anomalias magnéticas são perturbações ou desvios do campo geomagnético. Desta forma, para definir uma anomalia é necessário subtrair o valor do campo normal de cada medida tomada no levantamento. O campo normal é representado pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) (LUIZ & SILVA, 1995).

O IGRF calcula o campo magnético teórico baseado em medidas globais utilizando os coeficientes de Gauss através do grau e ordem 10, sendo estes termos de baixa ordem, algo que representa em grande parte o campo do núcleo da Terra. A subtração desses termos de baixa ordem das medidas do campo geomagnético permite o cálculo do campo magnético da crosta.

O campo geomagnético muda no decorrer do tempo e pode ser previsto por formulação matemática. Devido à dificuldade de atualização, somente são adotados novos modelos de IGRF em intervalos de cinco anos, destinados a representar o campo geomagnético para este período. Para fornecer essa capacidade preditiva, cada coeficiente de Gauss para qualquer modelo particular de IGRF tem um termo derivado que prevê o campo no futuro imediato, que assume cada mudança do coeficiente linearmente com o tempo.

As mudanças no campo geomagnético não são totalmente previsíveis, e as diferenças entre o IGRF previsto e o campo geomagnético verdadeiro aumentam ao longo de cada época (BLAKELY, 1996).

Nos levantamentos realizados em pequenas áreas, como no caso do presente estudo, um único valor de IGRF pode ser utilizado para o centro da área, e é subtraído de todas as medidas efetuadas. Em áreas extensas, é necessário usar diversos valores de IGRF: a área é dividida em sub-áreas e cada uma terá um valor de IGRF para o seu centro, ou pode ser usado um valor de IGRF para cada posição de medida, algo que depende da precisão do levantamento (LUIZ & SILVA, 1995).

### 5.1.6.3. Redução ao Pólo

A variação na forma das anomalias magnéticas torna complexa a análise dos dados. Esse problema pode ser contornado pela transformação dos dados originalmente coletados em qualquer latitude, para a latitude onde a inclinação do campo é 90° (pólo magnético). Após a transformação, os dados podem ser analisados como coletados no pólo, onde a magnetização induzida pelo campo tem a direção vertical (LUIZ & SILVA, 1995), ou seja, desloca anomalias lateralmente para situá-las sobre suas respectivas fontes e altera sua forma para que as fontes simétricas causem anomalias simétricas (BLAKELY, 1996).

Para aplicação deste processamento é necessário o conhecimento da direção de magnetização da fonte anômala. Com base nesta informação, a redução ao pólo pode ser aplicada em todos os dados, exceto para os dados coletados a altas latitudes magnéticas, e também torna-se instável em latitudes magnéticas baixas, devido ao azimute do corpo e da inclinação magnética se aproximarem de zero; uma alternativa para casos como este é a redução ao Equador (NABIGHIAN *et al*, 2005)

A redução ao pólo somente fornece resultados satisfatórios quando a anomalia é produzida por magnetização induzida. A presença de magnetização remanescente quase sempre modifica os resultados, a menos que se conheça a sua direção (LUIZ & SILVA, 1995).

### 5.1.6.4. Sinal Analítico

O sinal analítico é formado por uma combinação dos gradientes horizontais e verticais de uma anomalia magnética. O sinal analítico tem uma forma sobre os corpos causadores de anomalias magnéticas, e é dependente da localização dos corpos, sendo uma característica importante, que o sinal analítico é independente da direção de magnetização da fonte (BLAKELY, 1996).

A amplitude do sinal analítico é simplesmente relacionada à amplitude da magnetização, sendo facilmente derivadas nos três gradientes ortogonais do campo magnético total, utilizando a expressão:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde M é o campo magnético observado (MACLEOD *et al*, 2002).

Para uma fonte anômala isolada, o máximo da amplitude está situado exatamente sobre a mesma, e a largura da metade desta amplitude máxima corresponde ao dobro da profundidade deste corpo. Posições horizontais são geralmente bem determinadas por este método, mas as determinações de profundidade só são válidas para corpos poliédricos (NABIGHIAN *et al*, 2005).

#### **5.1.6.5. Continuação para Cima**

Comumente utilizada em dados magnéticos, este método simula a resposta do campo anômalo observado num plano acima daquele no qual os dados foram registrados. A continuação para cima elimina ou atenua anomalias de altas frequências, o que na prática representa a remoção das anomalias de fontes mais superficiais. É empregada para determinar a forma da variação magnética regional sobre uma área de levantamento, uma vez assumido que o campo regional é originado por estruturas localizadas em relativa profundidade (KEAREY *et al*, 2002).

#### **5.1.7. Interpretação de Anomalias Magnéticas e suas Aplicações**

A interpretação de anomalias magnéticas apresenta uma maior complexidade em comparação com outros métodos geofísicos, visto que as anomalias contêm elementos positivos e negativos que a torna dipolar. Enquanto a intensidade de magnetização é um vetor, a direção de magnetização de uma rocha está diretamente relacionada com sua anomalia magnética. Desta forma, corpos que apresentam formas idênticas podem gerar anomalias diferentes.

Ao contrário da gravimetria, por exemplo, que é outro método que utiliza campos potenciais, as anomalias magnéticas geralmente não estão relacionadas com a forma do corpo, e sim dependentes da quantidade, tamanho, forma e distribuição de seu conteúdo em minerais ferromagnéticos (NABIGHIAN *et al*, 2005; KEAREY *et al*, 2002).

A interpretação condizente com a realidade exige uma correlação de dados geofísicos com informações geológicas e/ou geoquímicas da área. No presente estudo, a interpretação dos dados magnetométricos deve necessariamente ser suportada por informações de composição dos principais litotipos, da evolução tectônica e das estruturas de deformação derivadas. Tais condicionantes permitem a delimitação da sequência metaultramáfica e a individualização de corpos mineralizados.

## 6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

### 6.1. Aquisição de Dados em Campo

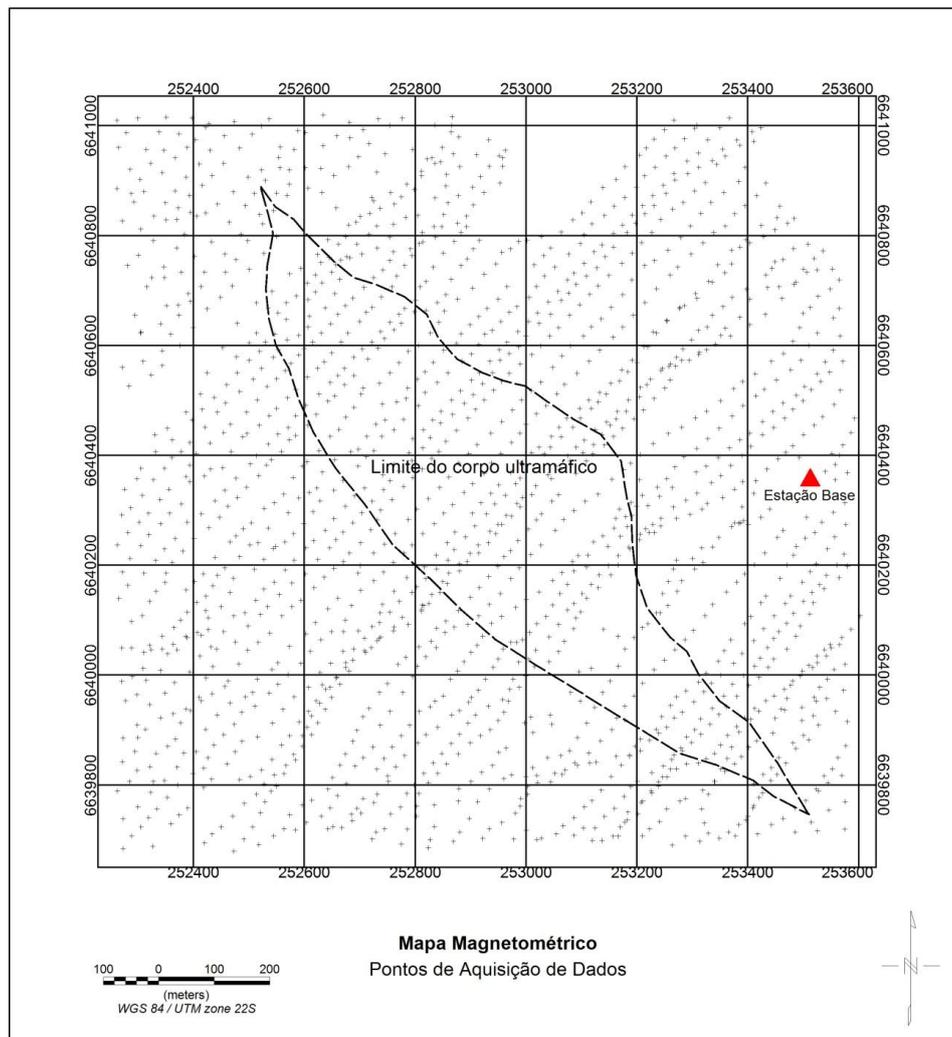
Para aquisição dos dados de campo magnético, foram utilizados magnetômetros de precessão de prótons. Seu sensor consiste num recipiente preenchido com um líquido rico em átomos de hidrogênio, como querosene ou água, envolto por um solenoide e uma bobina de magnetização detectora. Os núcleos de prótons agem como pequenos dipolos, alinhados em paralelo ao campo geomagnético.

Os equipamentos utilizados são de fabricação Canadense, desenvolvidos pela GEM SYSTEMS, modelo GSM 19, de propriedade da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Foi empregada uma estação base, para monitoramento da variação diurna do campo magnético e posterior correção dos dados, com leituras realizadas a cada 60 segundos. Esta estação foi posicionada nas coordenadas x:253551E y:6640307S, em um ponto afastado do alvo de estudo e de ruídos antrópicos como redes elétricas, residências, estradas, etc. (Figura 7).



**Figura 7.** Aquisição de dados em campo.

O alvo de estudo apresenta o formato de uma lente, com orientação de seu eixo de maior dimensão no sentido NW, deste modo, as leituras com o magnetômetro móvel foram realizadas em linhas com direção aproximada  $N45^\circ$ , perpendiculares ao corpo ultramáfico. As linhas possuem extensão variável, com 50 metros nos extremos NW e SE até 1800 metros no centro da área. Com intuito de identificar pequenas estruturas ou concentrações de minerais magnéticos na rocha ultramáfica, foi realizada a aquisição de pontos em detalhe, com espaçamento de 50 metros entre linhas, e entre pontos na linha de 25 metros, sendo efetuadas 1677 leituras (Figura 8).



**Figura 8.** Localização dos pontos de aquisição de dados.

A área apresenta topografia suave ondulada e acesso facilitado, pela presença de estradas vicinais e acessos a antigas residências, porém, no extremo nordeste, fora dos limites do corpo ultramáfico, não foi possível o término de algumas linhas em virtude da presença de densa vegetação (mata).

A aquisição de dados pelo método da magnetometria é rápida e versátil, neste estudo, devido ao grande número de pontos, foram realizadas duas campanhas de campo perfazendo um total de 10 dias trabalhados.

Para obtenção dos valores de altitude, coordenadas horizontais x e y usados na localização das estações magnetométricas, foi utilizado um receptor diferencial GPS Pathfinder Pro - XR da *Trimble Navigation Limited*. Durante o levantamento no campo, é importante ter atenção quanto à qualidade do sinal obtido (número de satélites que o receptor capta). O equipamento permite através de um coletor tipo *palm top*, a adição de

informações referentes a cada estação medida, para um bom controle do operador, como por exemplo, registro da data, número da linha de aquisição.

Para o procedimento de correção diferencial, foi escolhida a estação de referência no município de Santa Maria - RS, por ser a mais próxima da área de levantamento. Estas estações fazem parte de uma rede nacional de estações ativas gerenciadas e disponibilizadas na internet. Neste trabalho foram utilizados os dados da estação base do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

## **6.2. Processamento dos Dados**

Os dados magnetométricos foram submetidos à correção diurna, realizada para eliminar as variações provocadas por efeitos não geológicos, alterações estas que ocorrem nos valores verificados durante o dia. Este procedimento considera o uso de dois magnetômetros (base e móvel), para quantificação do campo magnético em intervalos regulares de tempo. O cálculo consiste na soma ou subtração da variação do magnetômetro fixo para o magnetômetro móvel usado no levantamento.

No presente estudo os valores obtidos com o magnetômetro base, foram subtraídos dos valores do magnetômetro móvel (*rover*), devido ao aumento de valores em relação ao primeiro. Após a subtração, foi somado o campo magnético terrestre conhecido para a área de estudo (Datum). Este procedimento adotado para correção diurna é baseado no manual do equipamento (GEM SYSTEMS, 2008). Posteriormente, os dados magnetométricos foram processados e apresentados sob a forma de mapas.

A plataforma Oasis Montaj, utilizada para tratamento dos dados, reúne um conjunto de programas utilizados para mapeamento e processamento de dados em geociências, por aplicação de filtros e algoritmos de modelagem. Nesta plataforma, os dados adquiridos em campo são inseridos em um banco de dados e preliminarmente processados por meio do método de interpolação por mínima curvatura.

Uma malha de pontos (*grid*) é gerada na forma de coordenadas x e y com espaçamento pré-determinado, de acordo com a distância das estações de campo. Esta plataforma possibilita o tratamento de dados sob diferentes possibilidades de filtragens.

As etapas de processamento dos dados magnetométricos são resumidas em: geração de base de dados na plataforma Oasis Montaj (estações magnetométricas); geração de malha de pontos (*grid*); geração de mapa do campo total; aplicação de filtros e geração de mapas magnetométricos.

A elaboração dos mapas magnetométricos foi baseada na interpolação por meio do método da mínima curvatura, num *grid* resultante de células de 15 m x 15 m por meio da plataforma Oasis Montaj, desenvolvido pela Geosoft. Na localização geográfica das estações foi empregado o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 22 Sul. O elipsóide de referência usado para este estudo foi o WGS 84, como uma superfície preferencial na qual são efetuados os cálculos da rede geodésica e são definidas as coordenadas de pontos (IBGE, 2008).

## **7. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **7.1. Apresentação e discussão dos resultados**

A análise e interpretação dos dados magnetométricos em uma área de alta complexidade geológica, deve considerar algumas premissas relativas à gênese do depósito e a evolução tectônica regional.

As rochas do Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico apresentam indícios de uma gênese relacionada ao magmatismo de fundo marinho, possivelmente relacionado a sequências ofiolíticas e reação entre magmas basálticos e rochas peridotíticas (BIONDI, 2003). O produto desta reação é um magma híbrido, dunitico, rico em Cromita, relacionado a processos que ocorrem em dorsais meso-oceânicas, após a fusão do manto lherzolítico e a subida do basalto em direção a superfície. Este magma precipita cromita durante o resfriamento e resulta em depósitos do tipo podiforme (SMIRNOV, 1976)

A evolução tectônica no ESRG indica o fechamento de antigos mares e o metamorfismo de toda sequência sedimentar litorânea (Complexo Metamórfico Vacacai) e magmática de fundo marinho (Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico) (PORCHER, 1995).

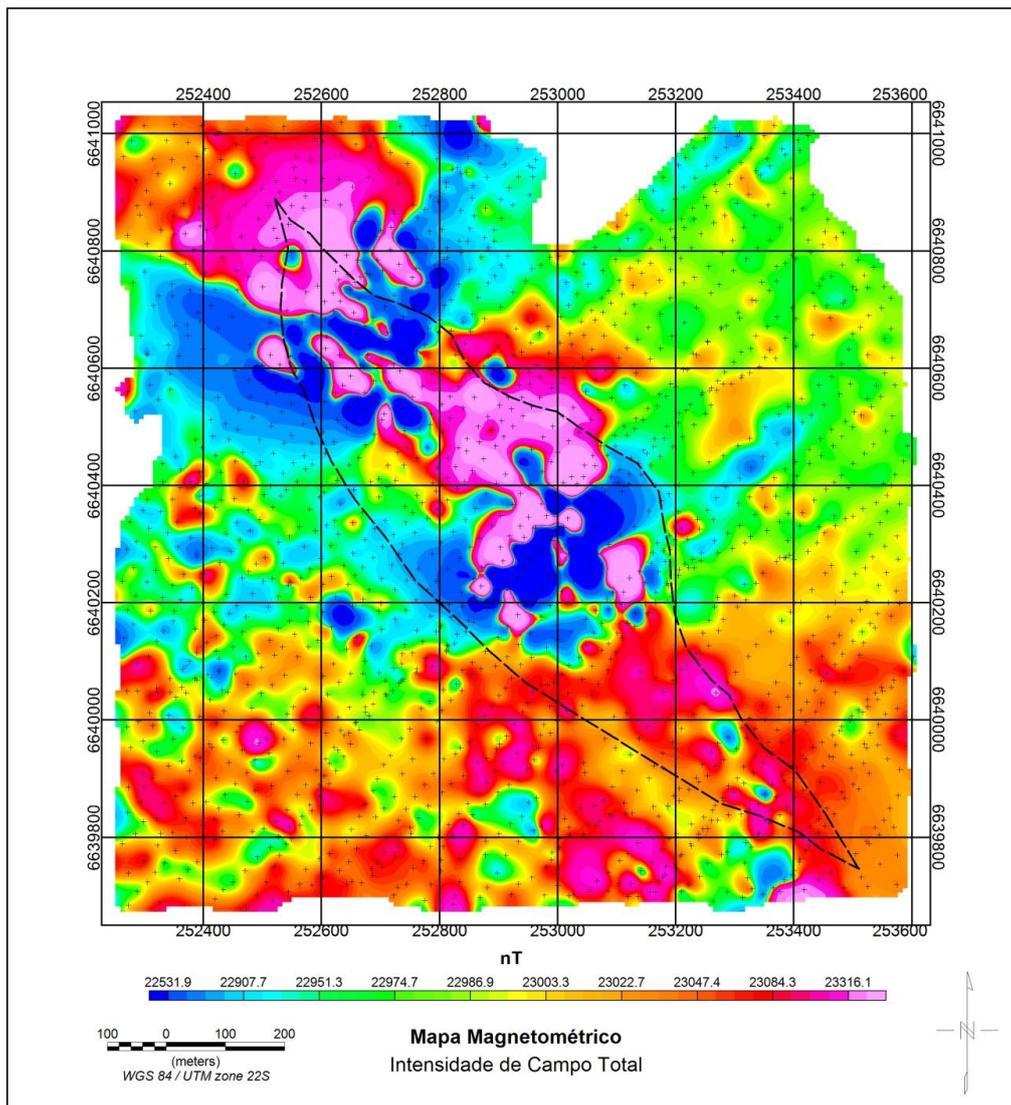
Levantamentos estruturais de caráter regional revelaram uma tectônica policíclica e a identificação de quatro fases de deformação. A primeira fase é marcada por dobramentos e transposição de acamamento nas unidades sedimentares. A segunda fase é expressa por imbricamentos tectônicos e clivagem de fratura de baixo ângulo, além de crenulações. A terceira fase é responsável por redobramento coaxial de estruturas anteriores e uma nova superfície de repartição. A quarta fase resultou em dobramentos, foliação metamórfica e estruturas do tipo domo e bacia (PORCHER, 1995).

Diante deste contexto, é possível afirmar que as mineralizações de cromita sofreram diversas perturbações e aparentemente devem estar alinhadas aos últimos eventos de deformação regional, com orientação geral dos corpos segundo a direção NE (terceira fase de deformação) e NW (quarta fase de deformação). Tais pressuposições servem de subsídio a interpretação dos dados magnetométricos

A partir das leituras da intensidade do campo magnético obtidas nas estações magnetométricas, foi inicialmente gerado um mapa dos valores de campo magnético total. Este produto permite a identificação de dois domínios magnéticos distintos, no

âmbito da sequencia metaultramáfica (porções central e noroeste), além de uma porção com intensidade mediana de campo magnético, na porção SE (Figura 9).

Os domínios magnéticos central e noroeste formam dipolos magnéticos, ou seja, são ladeados por áreas de baixa intensidade. Esta é uma feição que indica a presença de corpos magnéticos individuais, ou um conjunto de pequenos corpos reunidos em dois domínios devido a suavização do algoritmo de interpolação.

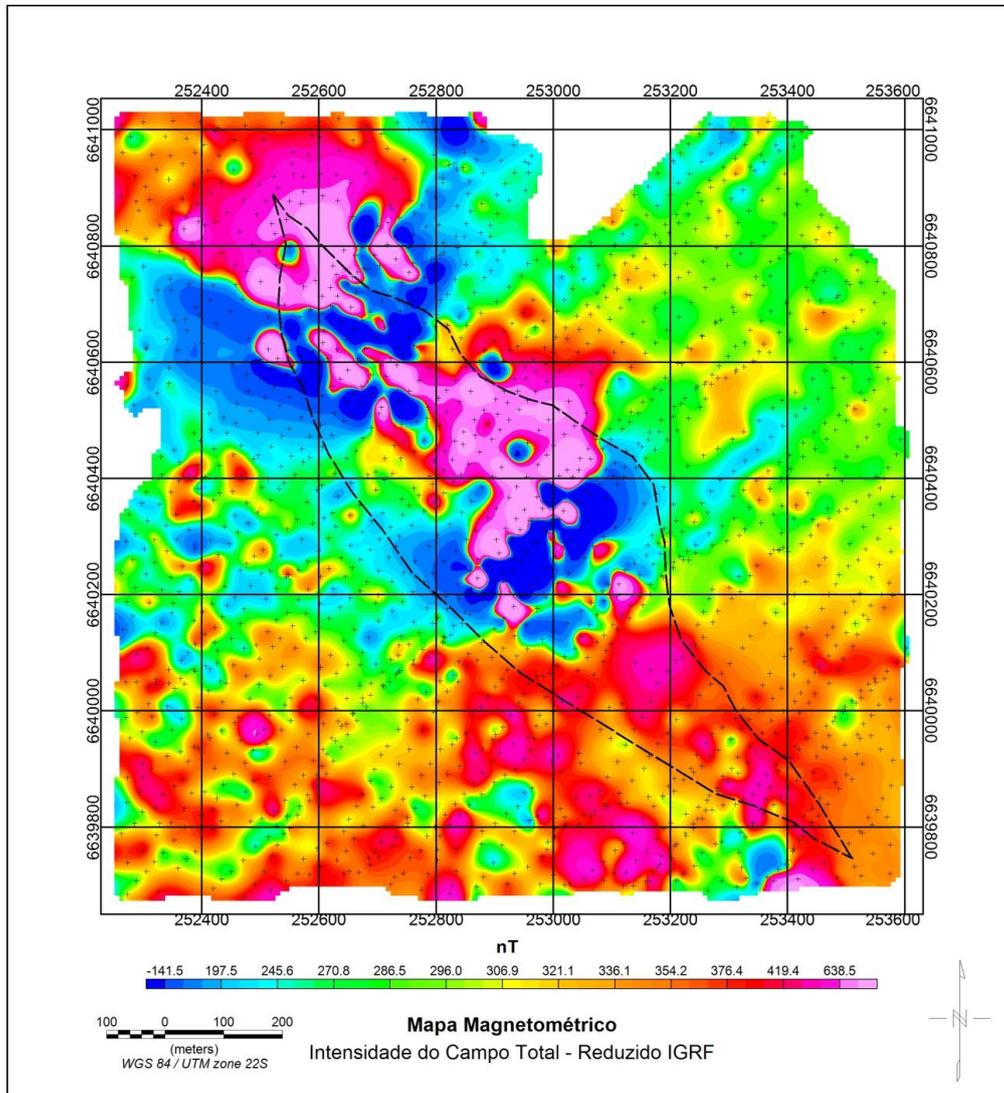


**Figura 9.** Mapa Magnetométrico de Intensidade do Campo Total.

O domínio magnético da porção SE apresenta continuidade lateral para além dos domínios da sequencia metaultramáfica, algo que aparentemente indica uma semelhança em termos litológicos entre rochas do Complexo Metamórfico Vacacai. Desta forma, é provável que tenha havido metassomatismo e remobilização de elementos químicos

provenientes da sequencia metassedimentar, e contaminação da sequencia metaultrabásica, durante as sucessivas fases de deformações.

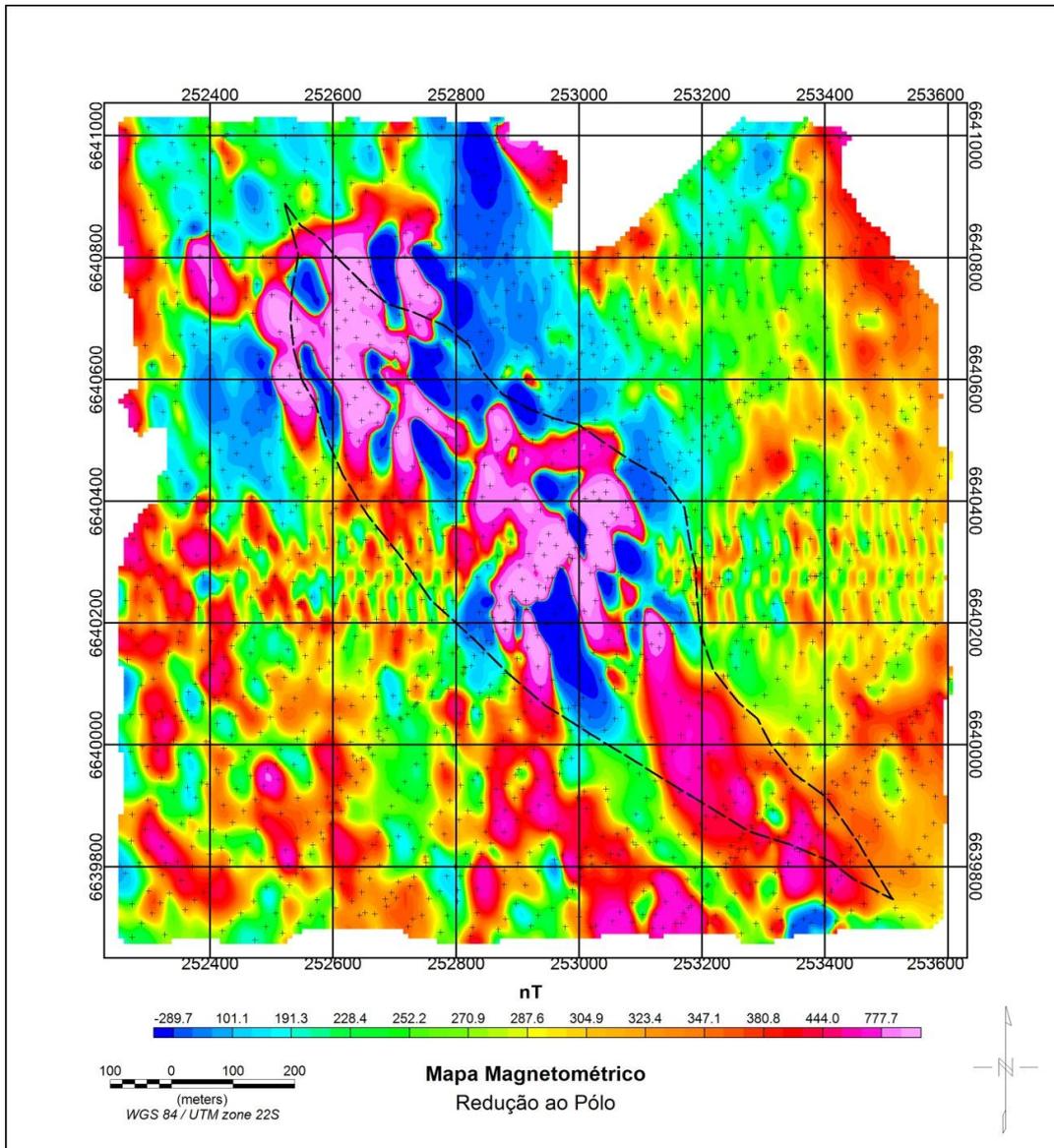
Posteriormente, foi gerado o mapa com a redução do IGRF. Este produto apresenta bastante semelhança ao mapa de campo total, apenas com alteração de intensidade de campo magnético (Figura 10).



**Figura 10.** Mapa Magnetométrico de Intensidade do Campo Total reduzido o IGRF.

A partir do mapa reduzido, foi aplicado o algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT) e gerado mapas de Redução ao polo (Figura 11), Amplitude do Sinal Analítico (Figura 12), Magnetométrico Regional (Figura 13), Magnetométrico Residual (Figura 14). Continuação para Cima – 25m (Figura 15), Continuação para Cima – 50m (Figura 16) e Continuação para Cima – 100m (Figura 17).

O mapa de redução ao pólo apresenta também os três domínios magnéticos previamente individualizados, embora de forma um tanto contínuas e com tendência de orientação na direção N-S. Este filtro tem por finalidade, deslocar anomalias lateralmente para situá-las sobre suas respectivas fontes e altera sua forma para que as fontes simétricas causem anomalias simétricas (Figura 11).



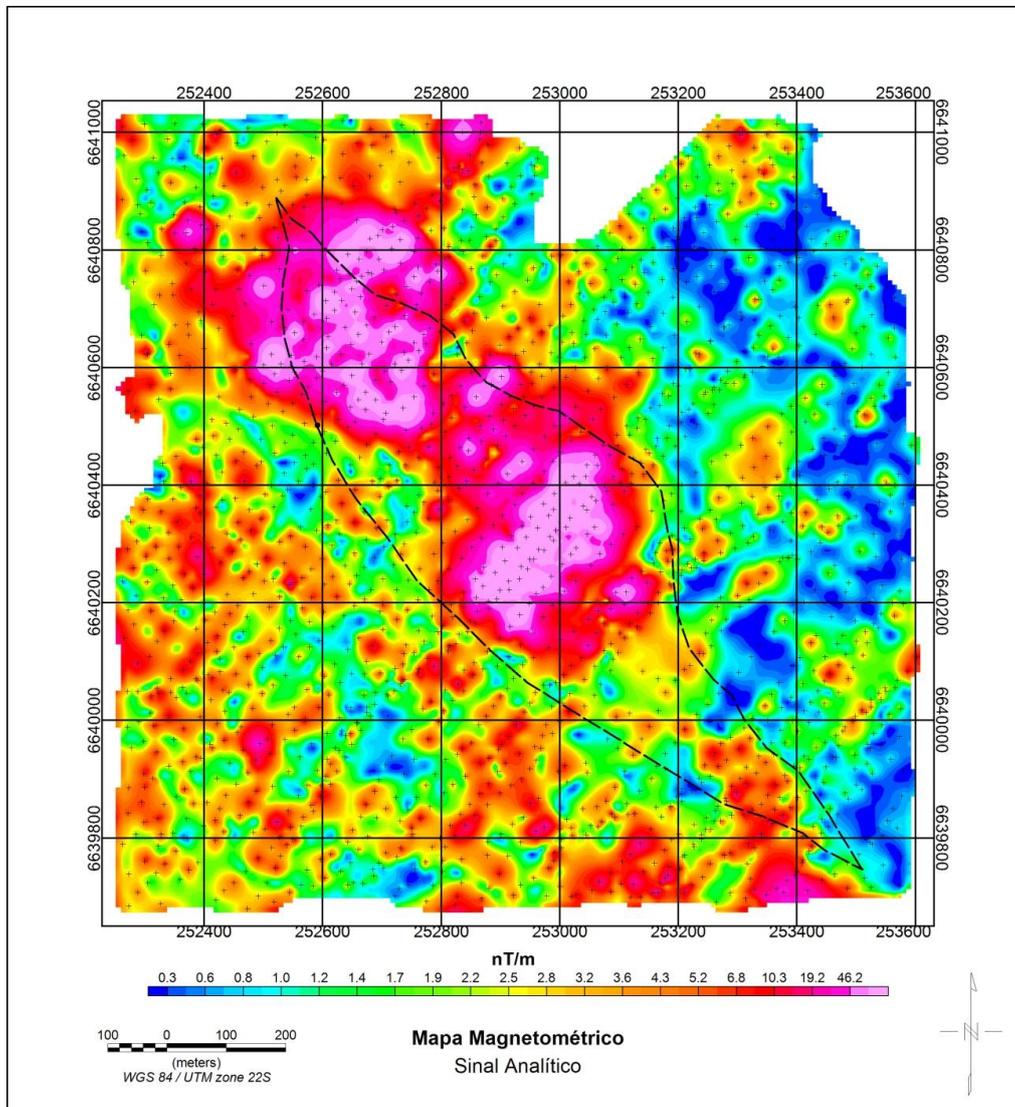
**Figura 11.** Mapa Magnetométrico de Redução ao Pólo.

Neste caso, os três domínios magnéticos estão contidos nos limites da sequência metaultramáfica, embora seja provável que este padrão reflita posições próximas da superfície, diante do fato da sequência metaultramáfica apresentar mergulhos variáveis no sentido sudeste, devido ao cavalgamento da sequência metamórfica Vacacai no sentido NE. Também é possível o reconhecimento de corpos individualizados nos

domínios central e noroeste, embora com tendência de orientação na direção N-S, algo não condiz com o padrão estrutural das últimas fases de deformação (NE e NW).

O mapa de Amplitude de sinal Analítico realça somente os domínios magnéticos central e noroeste, basicamente contidos nos limites da sequência metaultramáfica. Neste caso, predomina uma interpolação difusa dos pontos, que aparentemente aglutinou eventuais corpos individualizados e que foram reunidos em dois grandes corpos (Figura 12).

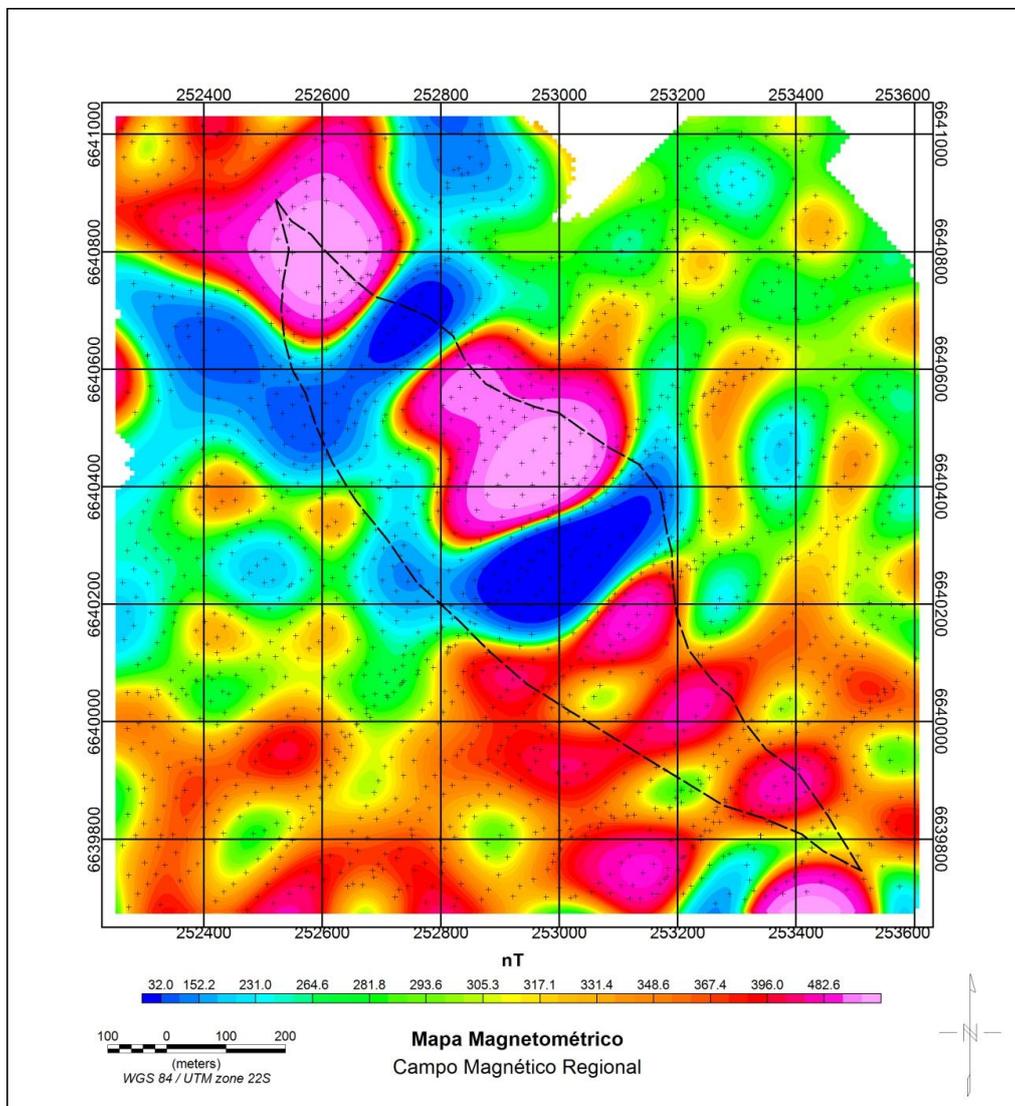
O filtro sinal analítico possui como sua principal característica o posicionamento das amplitudes resultantes imediatamente acima dos limites das estruturas. Portanto, os domínios magnéticos limitados neste produto devem refletir posições rasas dos corpos magnéticos.



**Figura 12.** Mapa Magnetométrico de Amplitude do Sinal Analítico.

No Mapa Magnetométrico Regional também é possível o reconhecimento de três domínios magnéticos, dos quais o domínio sudeste apresenta valores mais atenuados, em semelhança aos mapas de campo magnético total e de redução ao pólo. Neste caso, os principais domínios magnéticos não permitem a distinção de corpos individualizados, possivelmente devido a efeitos de suavização relativos ao algoritmo de interpolação, além de ultrapassarem os limites da sequencia metaultramáfica (Figura 13).

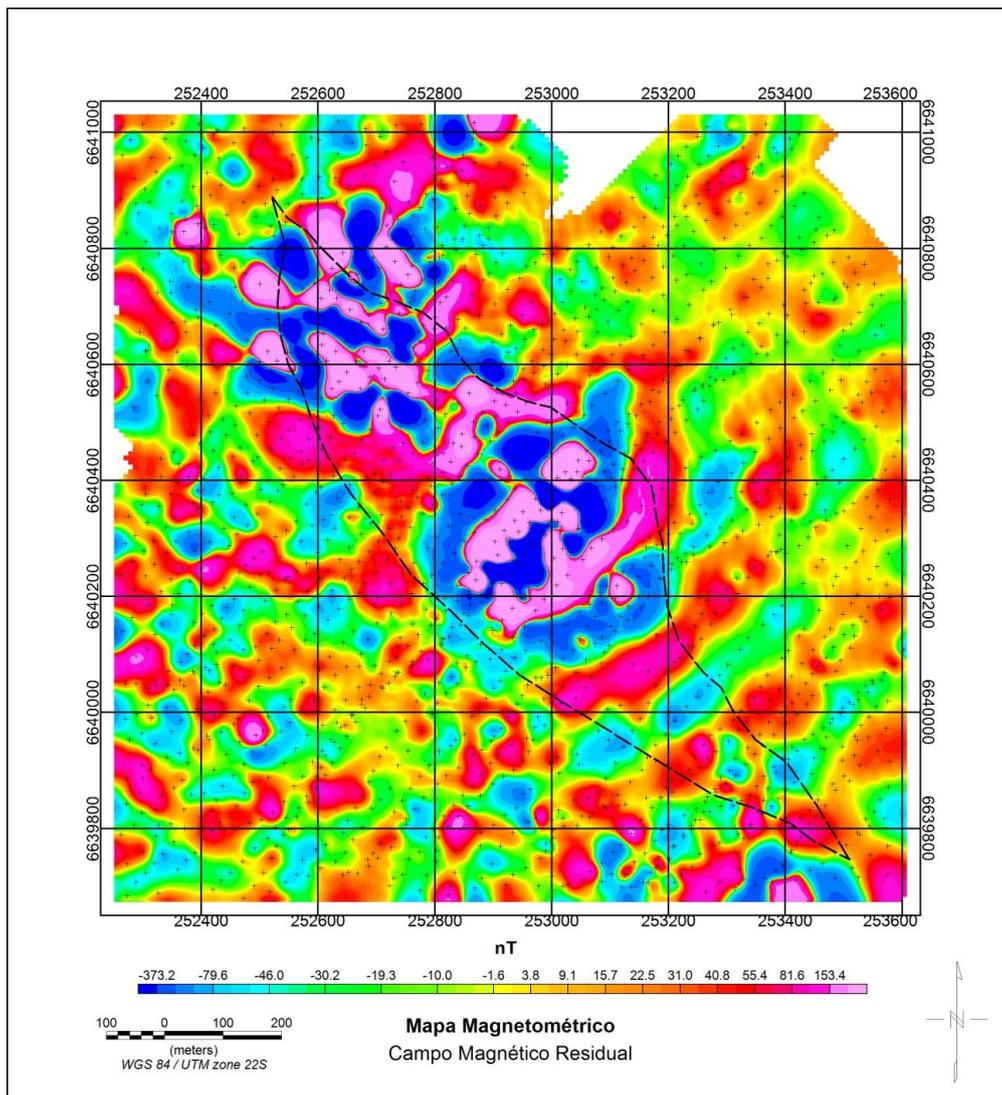
Este algoritmo consiste num filtro do tipo passa baixa que elimina sinais de alta frequência, com o propósito de realçar estruturas ou fontes profundas. Contudo, a tendência de posicionamento dos domínios magnéticos para além dos limites da sequencia metaultramáfica, aparentemente deslocados no sentido NE, são conflitantes com a realidade estrutural de mergulho da foliação no sentido SW.



**Figura 13.** Mapa Magnetométrico Regional.

No Mapa Magnetométrico Residual ocorrem diversos domínios magnéticos individualizados predominantemente contidos nos limites da sequência metaultramáfica, com acentuada atenuação no domínio SE da sequência (Figura 14).

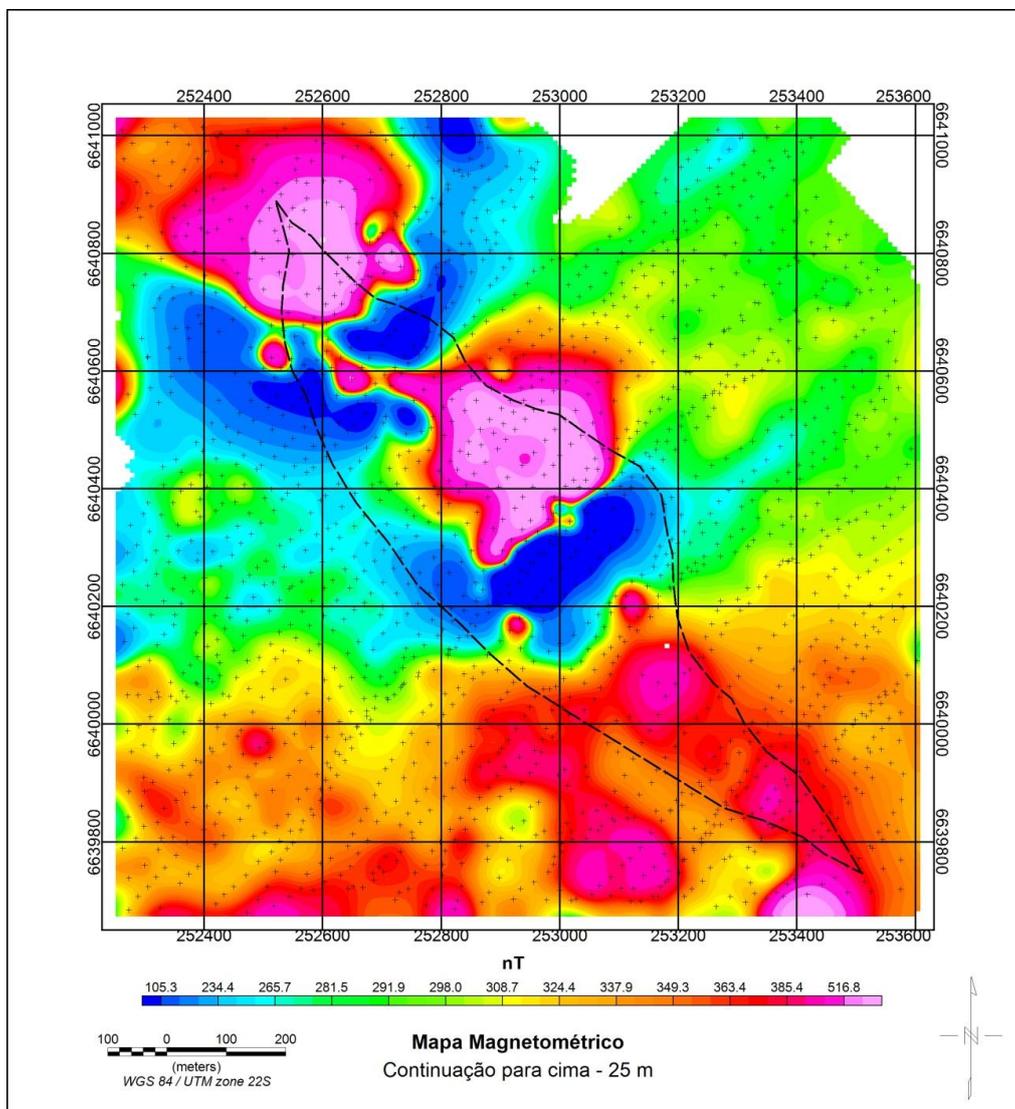
É importante ressaltar o padrão de orientação dos corpos individualizados, basicamente limitados às direções NE e NW. Os corpos centrais apresentam orientação NE, ao passo que os corpos do extremo NW da sequência metaultramáfica apresentam orientação NW. Este padrão é condizente com a evolução estrutural da área e com o comportamento bastante dúctil das rochas que constituem esta sequência. A terceira fase de deformação resultou em estruturas orientadas na direção NE-SW, predominante na porção central que aparentemente sofreu pouca alteração no quarto evento de deformação, que resultou em estruturas orientadas na direção NW-SE resultantes da reorientação de estruturas da terceira fase, num contexto de maior esforço em relação a posição central da sequência.



**Figura 14.** Mapa Magnetométrico Residual.

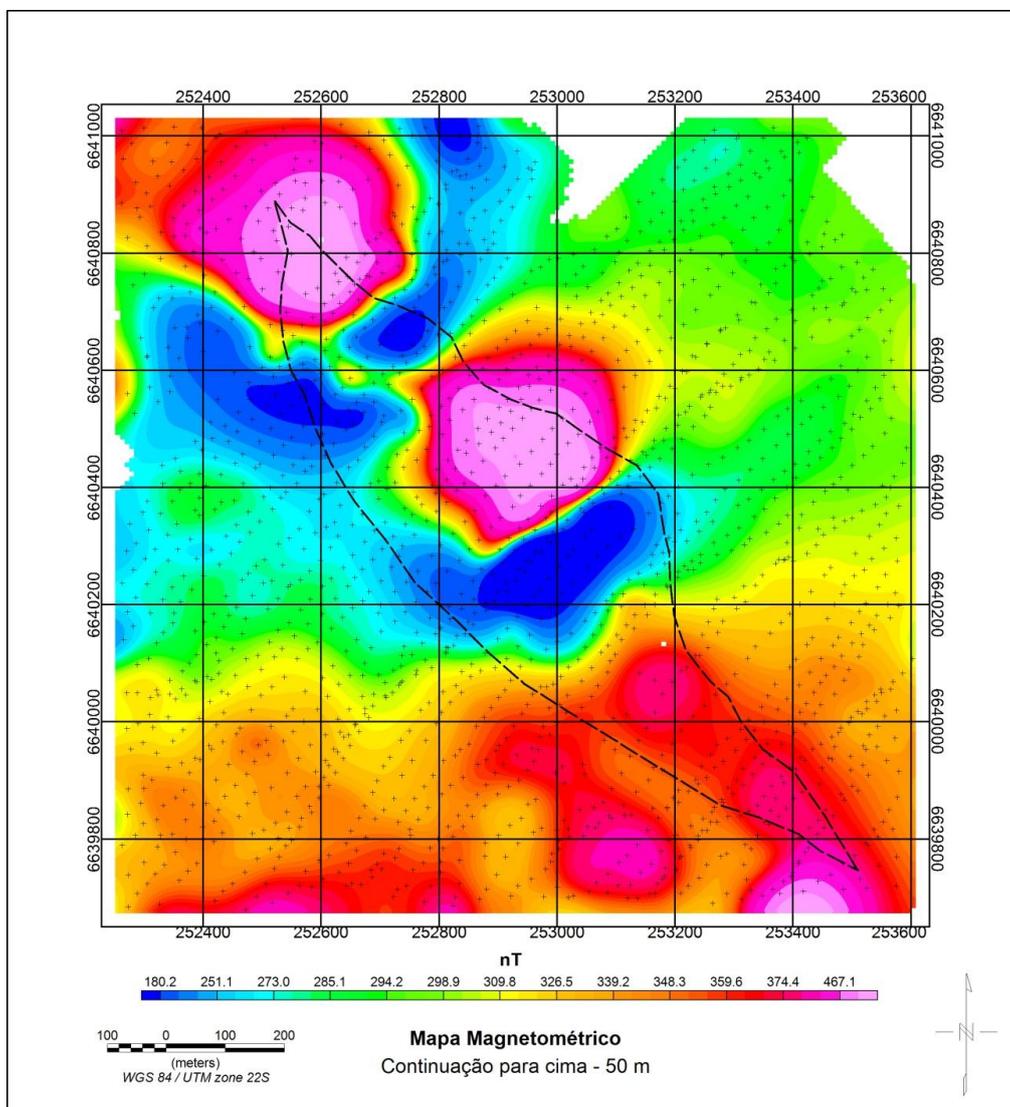
No Mapa Magnetométrico de Continuação para Cima – 25 metros, é possível reconhecer os três domínios magnéticos previamente descritos em outros produtos, também com atenuação de sinal no domínio SE, além da tendência dos domínios central e SW ultrapassarem os limites da sequência metamórfica (Figura 15).

Este mapa elimina as baixas frequências e realça estruturas para 12,5 metros de profundidade. Neste sentido, os domínios magnéticos devem refletir corpos rasos, embora discordantes do contexto litológico, pois a tendência de deslocamento para além dos limites da sequência metaultramáfica no sentido NE, não condiz com a realidade geológica da área. Neste sentido ocorrem arenitos da Formação São Rafael, desprovidos de qualquer estrutura magnética reconhecida em campo ou descrito na literatura.



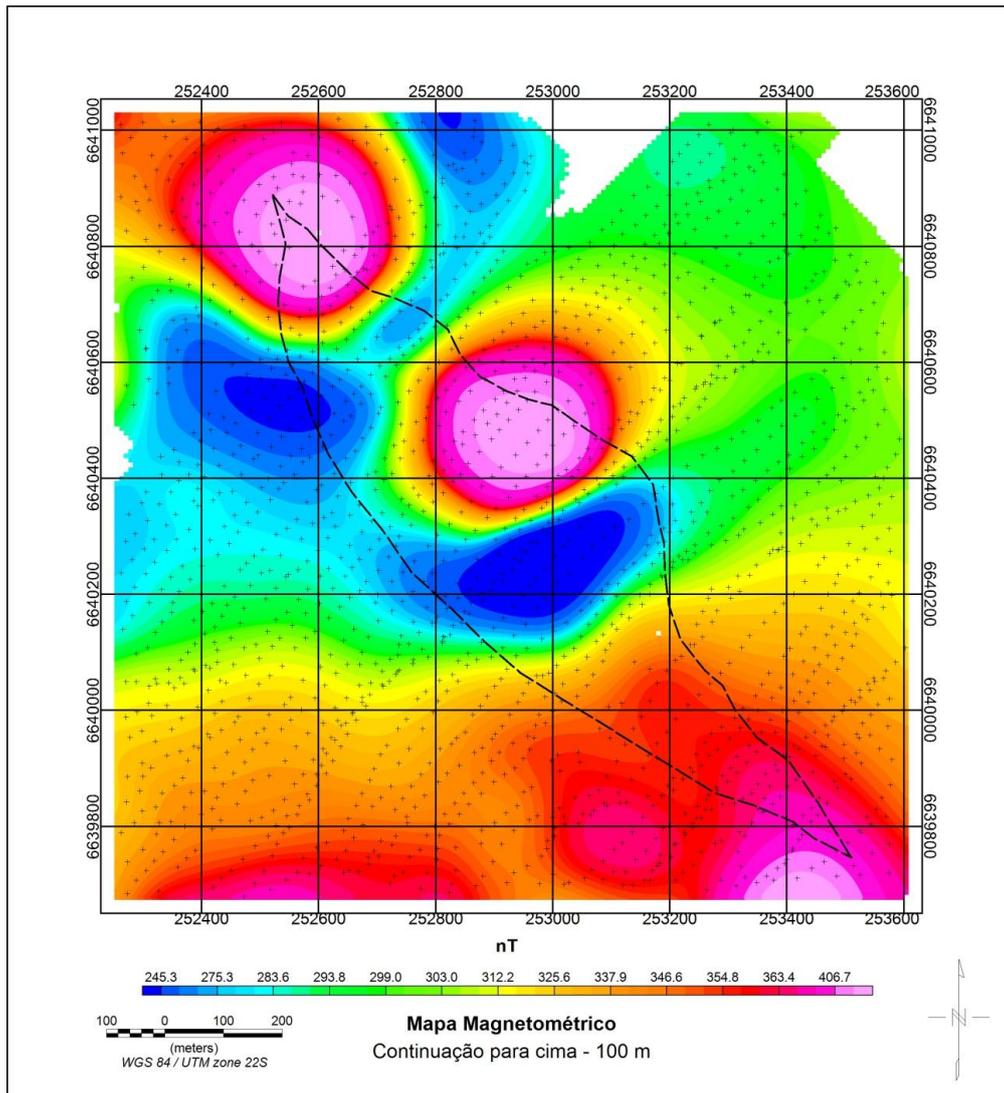
**Figura 15.** Mapa Magnetométrico de Continuação para Cima - 25 metros.

Nos Mapas Magnetométricos de Continuação para Cima – 50 metros e 100 metros, também permitem o reconhecimento de três domínios magnéticos, além da atenuação de sinal no domínio SE, e tendência dos domínios central e SW ultrapassarem os limites da sequência metamórfica (Figura 16 e 17).



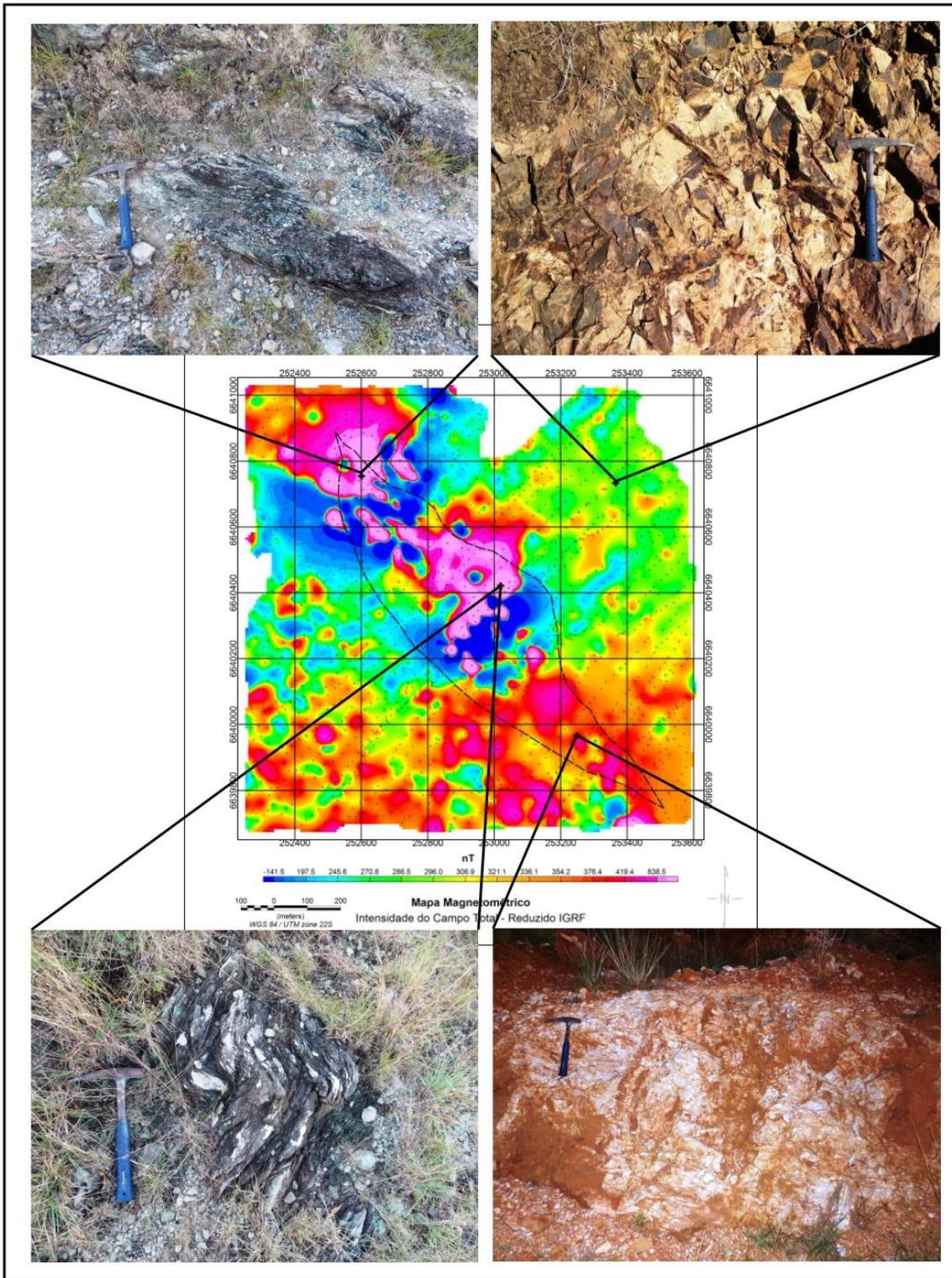
**Figura 16.** Mapa Magnetométrico de Continuação para Cima - 50 metros.

Nestes mapas ocorre a eliminação de altas frequências e indicam estruturas cada vez mais profundas, relativo às profundidades de 25 metros e 50 metros. Também é patente a maior suavização dos domínios magnéticos com aumento da profundidade. Contudo a tendência de avanço dos domínios para além dos limites da sequência metaultramáfica no sentido NE em ambos os mapas, também é algo que não condiz com a realidade estrutural, visto que os limites NE e NW da sequência metaultramáfica apresentam foliação com mergulho para SW.



**Figura 17.** Mapa Magnetométrico de Continuação para Cima - 100 metros.

De forma a exemplificar os resultados obtidos, foram tiradas em campo, fotos de afloramentos em cada um dos domínios magnéticos principais encontrados, sendo notável nos domínios central e noroeste, a presença de rochas do Complexo Básico Ultrabásico. O domínio magnético da porção SE, com intensidade moderada de campo magnético, apresenta forte alteração com quartzo. Na porção NE dos mapas, com baixa intensidade do campo magnético, são encontradas rochas da formação São Rafael (Figura 18).



**Figura 18.** Imagens obtidas em campo com as rochas relacionadas a cada domínio magnético.

## **7.2. Relações entre mapas magnetométricos e ocorrências mineralizadas em cromo**

Com o intuito de avaliar a aplicabilidade da magnetometria em estudos geológicos com diferentes escalas de levantamento e questões relativas a resolução e a identificação de alvos magnéticos, são apresentados alguns estudos de caso.

Na região de Cláudio (MG), porção sul do Cráton São Francisco, foram avaliados a adequação dos dados aerogeofísicos para a delimitação de domínios geológicos com objetivo de subsidiar o mapeamento geológico na escala de 1:100.000. As linhas de voo foram espaçadas de 250 m. No mapa de amplitude do sinal analítico, foi possível mapear o enxame de diques máficos que corta a região, no mapa de campo magnético total, foram delimitadas feições estruturais, não necessariamente relacionadas à intrusão de diques, bem como contatos, descontinuidades ou lineamentos. Desta forma, foi constatada a eficiência dos dados magnetométricos para a delimitação de unidades litológicas específicas e de expressão regional, tais como corpos máficos e ultramáficos. (RUY *et al.*, 2006).

No trabalho de Carrino (2007), os dados aeromagnetométricos de detalhe foram processados com espaçamento entre linhas de voo de 250 metros, adquiridos na província mineral de Carajás - Pará, e identificadas assinaturas geofísicas de alta intensidade associadas as rochas máficas/ultramáficas correspondentes ao depósito de Cr-EGP de Luanga, que possui aproximadamente 7 quilômetros de extensão e 2 quilômetros de largura, com sugestão de novas áreas para pesquisas de campo.

O trabalho de Suárez *et al* (2012) apresenta o estudo geológico e geofísico magnetométrico terrestre de detalhe (malha irregular, com espaçamento aproximado de 50 metros entre estações magnetométricas) do corpo máfico-ultramáfico de Las Cañas, província de San Luis, Argentina. Esta rocha consiste num corpo intrusivo e alongado concordante com a estruturação adjacente, encaixado em xistos pertencentes ao Complexo Metamórfico de Las Aguadas. Estas rochas mostram alteração e mineralização de Ni, Cr, Fe, Zn e EGP. Os resultados demonstram coincidência entre anomalia magnética de alta intensidade na zona mineralizada em setores ultramáficos com picos positivos de 1,955 nT. Contrastes de aproximadamente 500 nT caracterizam altos magnéticos sem mineralização, enquanto que as rochas metamórficas encaixantes, raramente excedem 100 nT de amplitude.

Bosum (1970) apresenta os resultados de investigações magnéticas de rochas em laboratório e medições de campo magnético terrestre no vale Logar, no Afeganistão. As investigações magnéticas em laboratório de amostras do minério e da rocha encaixante demonstraram que a cromita é fortemente magnética, enquanto a rocha encaixante é predominantemente não-magnético ou parcialmente magnético. As medidas em campo foram dispostas com espaçamento entre pontos de 10 metros, em locais de interesse este espaçamento foi reduzido a 5 metros, devido a presença de pequenos corpos de Cromita. Os mapas de campo magnético mostram anomalias de alta intensidade, da ordem de 1000 nT acima das ocorrências conhecidas de cromita. As anomalias da rocha encaixante, com cerca de 100 nT, foram observadas apenas acima de diques básicos.

Yungul (1956) realizou levantamento magnetométrico em depósitos de minério de cromita na mina de Guleman, na Turquia, com espaçamento entre pontos de medida de 20 metros. Anomalias positivas de mais de 1000 nT foram medidas sobre corpos de minério aflorante, confirmados por amostragem em de furos de sondagem, que indicaram altos teores de minério.

Nos trabalhos com malha de aquisição de dados em detalhe, os produtos magnetométricos mais eficazes aos objetivos propostos foram os mapas de campo magnético anômalo total, com destaque para o mapa de campo magnético total no trabalho de Suárez *et al* (2012), que permitiu a individualização de corpos magnéticos de algumas centenas de metros, assim como o trabalho de Bosum (1970), o qual identificou pequenas ocorrências de Cromita por meio das medidas magnetométricas.

Dentre os diversos mapas magnetométricos gerados neste trabalho para a área em estudos, o mapa de campo magnético residual revelou maior proximidade com a estruturação do terreno e orientação geral das mineralizações, segundo a última fase de deformação regional. Os demais produtos resultaram em uma suavização excessiva dos domínios magnéticos e não permitiram a individualização de pequenos corpos.

## 8. CONCLUSÕES

Os estudos de pesquisa mineral são fundamentais para o reconhecimento e incorporação de novas reservas, visto a crescente demanda por bens minerais em atendimento ao mercado interno, para exportação e equilíbrio da balança comercial.

A cromita é um mineral fundamental para a indústria, baseado no fato deste ser a principal fonte de cromo, que por sua vez é o constituinte essencial de aços e ligas não ferrosas. A cromita é um mineral estratégico para os países industrializados, pois sua produção mundial está restrita a poucas nações.

O método da magnetometria apresenta aplicabilidade na pesquisa de depósitos minerais, devido ao contraste de suscetibilidade magnética entre os minerais ferromagnéticos presentes nos depósitos com as rochas encaixantes.

A rapidez na aquisição de dados unida a ausência de ruídos em campo aberto e as múltiplas formas de processamento torna esta ferramenta indispensável na pesquisa de depósitos minerais de cromita/ferrocromita associados com rochas ultramáficas.

A opção por uma malha de aquisição densa foi favorável, pois permitiu a individualização de corpos magnéticos que podem ser diretamente relacionados a ocorrências de cromo.

Os diversos produtos de processamento relevaram a heterogeneidade da sequencia metaultramáfica em estudos, aparentemente descaracterizada em termos litológicos em sua porção SE, baseado da semelhança de valores com as rochas metassedimentares adjacentes. É provável que a evolução tectônica policíclica tenha causado a incorporação de sílica ou de fragmentos de metassedimentos e diluído os teores de minerais máficos nesta porção da área.

Foram reconhecidos dois domínios magnéticos em basicamente todos os produtos magnetométricos (central e noroeste), que em alguns casos ficaram contidos nos limites da sequencia metaultramáfica, mas que em outros ocorre recobrimento parcial de arenitos da Formação São Rafael (a nordeste da área). Tais recobrimentos não condizem o sentido de mergulho da sequencia metaultrabásica para sudoeste, ou seja, posicionamento dos domínios magnéticos contrários a realidade geológica local.

A eficácia do algoritmo na geração do mapa de campo anômalo residual reside na possibilidade de individualização de corpos magnéticos, algo que depende em parte de uma malha de aquisição de dados de alta densidade. Contudo, este produto reflete

uma realidade de múltiplas ocorrências de cromita num cenário de quatro fases de deformação, com ênfase para a orientação de alvos para nordeste na terceira fase e reorientação parcial para noroeste na quarta fase. Tais orientações são reconhecidas neste produto magnetométrico.

Neste sentido, fica demonstrada a aplicabilidade do método da magnetometria na individualização de ocorrências minerais magnéticas de dimensões métricas, e a possibilidade de uso na seleção de alvos para perfuração, amostragem e quantificação de teores, em rotinas de pesquisas por depósitos de cromo.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNDT, Nicholas. GANINO, Clément.. **Metals and Society: An introduction to economic geology**. New York: Springer, 2012. 160p.

BIONDI, João Carlos.. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 552p.

BLAKELY, Richard J.. **Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 441 p.

BORBA, André Weissheimer. **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e petrografia isotrópica**. 109 p. Tese (Doutorado em Geociências), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BOSUM, W.. An Example of Chromite prospection by Magnetics. **Geophysical Prospecting**, v. 17, n. 1, p. 637-653, dec. 1970.

BURGER, Henry Robert; SHEEHAN, Anne F.; JONES, Craig H.. **Introduction to Applied Geophysics: Exploration geophysics of the shallow subsurface**. New York: Norton & Company, 2006. 622 p

CARRINO, Thais Andressa; SOUZA FILHO, Carlos Roberto de; LEITE, Emilson Pereira.. Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, província mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, vol.25 n.3, p. 307-320, jul-set. 2007

CHATTERJEE, K. K. **Uses of Metals and Metallic Minerals**. New Delhi: New Age International, 2007. 326 p.

CHEMALE Jr., Farid. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: HOLZ, Michael; DE ROS, Luiz Fernando (Org.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 13-52.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília. DNPM, 2014. 141 p.

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. **Mapa Geológico do estado do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000**. CPRM: Porto Alegre, 2008.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. New York. Cambridge University Press. 2014. p. 438.

FRAGOSO-CÉSAR, Antônio Romalino Santos. **Tectônica de placas no Ciclo Brasileiro: as orogenias dos cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul.** 366 p. Tese (Doutorado em Geociências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991

GEM SYSTEMS. **GSM-8 instruction manual.** Markham, 2008. Manual release 7.2. Disponível em: <<http://www.allied-ssociates.co.uk/pdfmanuals/GSM8%20Manual%20February%2021%202008.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

HARTMANN, Léo Afraneo; REMUS, Marcus Vinicius Dorneles. Origem e Evolução das Rochas Ultramáficas do Rio Grande do Sul desde o Arqueano até o Cambriano. In: HOLZ, Michael; DE ROS, Luiz Fernando (Org.). **Geologia do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000a. p. 53-78.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **RBMC: rede brasileira de monitoramento contínuo relatório de informação da Estação Santa Maria RS – SMAR.** Santa Maria, 2008.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration.** 3rd. ed. United Kingdom: Blackwell Publishing Company, 2002.

KONZEN, Luciano. **Métodos Potenciais: Aplicações em Petróleo e Recursos Minerais.** São Paulo: IAG/USP, 2002. CD-ROOM

LOWRIE, William. **Fundamentals of Geophysics.** Second Edition. New York: Cambridge University Press, 2007. 375 p.

LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. **Geofísica de prospecção.** Belém: Universidade Federal do Pará, 1995.

MACLEOD, Ian N.; JONES, Keith; DAI, Ting Fan. **3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes.** In: KONZEN, Luciano. Métodos Potenciais: Aplicações em Petróleo e Recursos Minerais. São Paulo: IAG/USP, 2002. CD-ROOM.

MOON, C. J.; WATHELEY, M. K. G.; EVANS, A. M. **Introduction to Mineral Exploration.** 2 nd ed. Blackwell Publishing Company, 2006. 481 p.

NABIGHIAN, Misac N. et al.. The historical development of the magnetic method in exploration. **Geophysics**, [S. l.], v. 70, n. 6, p. 33-61, nov-dec. 2005.

NARDI, Lauro Valentim Stoll; BITENCOURT, Maria de Fátima. Geologia, Petrologia e Geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 153-169, jun. 1989.

PEREIRA, Ronaldo Mello; **Fundamentos de Prospecção Mineral.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 167p

PORCHER, Carlos Alfredo; *et al.* Passo do Salsinho – Folha SH.22-Y-A-1-4. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**, Brasília: CPRM, 1995.372 p.

RUY Andréia Cristina; SILVA Adalene Moreira; TOLEDO; Catarina L. Benfica, SOUZA FILHO, Carlos Roberto de.. Uso de dados aerogeofísicos de alta densidade para mapeamento geológico em terrenos altamente intemperizados: o estudo de caso da região de Cláudio, porção sul do Cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 535-546, out-dez, 2006.

SMIRNOV, Vladimir Ivanovich.. **Geology of mineral deposits**. Moscou: Mir Publishers, 1976. 520p.

SOLIANI Jr., Enio. **Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica**. 239 p. Tese (Doutorado em Geociências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

SOUZA, SAMUEL BARBOSA. **Feições regionais da porção emersa do Alto de Cabo-Frio e sua continuação para as Bacias de Campos e Santos**. 131 p. Dissertação (Faculdade de Geologia), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SÚAREZ, A. O.; MOROSINI, A.; ULACCO, H.; DÚRAN, A. C. Geología y geofísica del cuerpo máfico-ultramáfico Las Cañas, Provincia de San Luis. **Serie Correlación Geológica**, San Miguel de Tucumán, v. 28, n. 2, p. 151-166, 201

TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, M. Cristina Motta; FAIRCHILD, Thomas Rich; TAIOLI, Fabio. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568p.

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

YUNGUL, S.. Prospecting for Chromite with gravimeter and magnetometer over rugged topography in east Turkey. **Geophysics**, v. 21, n. 2, p. 433-454, 1956.