

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

ALICE MARQUES PEREIRA

PROSPECÇÃO MAGNETOMÉTRICA EM INTRUSIVA BÁSICA COM
INDÍCIOS DE MINERALIZAÇÃO AURÍFERA NO MUNICÍPIO DE SÃO
SEPÉ - RS

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do título de Mestre em
Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)

2014

551 Pereira, Alice Marques
P436p Prospecção magnetométrica em intrusiva básica com
 indícios de mineralização aurífera no município de São Sepé -
 RS / Alice Marques Pereira. - Rio Claro, 2014
 70 f. : il., figs., fots., mapas

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

 1. Geofísica. 2. Magnetometria. 3. Fraturas. 4.
 Geoquímica. I. Título.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Prof.^a Dra. Yára Regina Marangoni

Alice Marques Pereira

Aluna

Rio Claro, 16 de Junho de 2014.

Resultado: Aprovada

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram durante esta caminhada, em especial a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e pela força que ele me dá.

Aos meus pais Jair e Celanira, que com seus ensinamentos e carinho sempre me incentivaram a buscar minhas metas, mesmo que isso me levasse a ficar um pouco distante deles. Agradeço pelo incentivo, confiança e auxílio. Amo vocês!

A minha irmã Cláudia e meus sobrinhos Eduardo e Fabiane por todos os momentos que estiveram ao meu lado, por todo o carinho atribuído e por sempre estarem dispostos a me ajudar.

Ao meu noivo Flávio Keller Lau pelo amor e carinho, por toda sua ajuda, compreensão, e companheirismo.

Ao orientador Prof^o Dr. César Augusto Moreira pela dedicação e ensinamentos no desenvolvimento desta dissertação.

Aos Professores Dr. Walter Malagutti Filho, Dr. João Carlos Dourado e Dra. Yára Regina Marangoni por suas sugestões ao progresso e melhoria deste trabalho.

Aos queridos estudantes da Unipampa David de Queiroz, Diogo Silva, Victor Macêdo e ex-colegas de graduação Jorge Bitencourt e Josué Baltezan pela amizade e participação nos trabalhos de campo.

Ao amigo José Ricardo Bortolin, por me ensinar a operar o GPS diferencial.

Ao amigo Lenon Ilha, pelo apoio e esclarecimento de algumas ambiguidades.

Aos amigos pós-graduandos em especial aos gaúchos Adriano, Camila, Felipe, Syngra e Karla pelas horas descontraídas que passamos juntos.

Ao programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa concedida.

A secretaria da pós-graduação Rosangela Vacello, que esteve fornecendo todo o apoio em relação a documentações.

Aos proprietários da fazenda Santa Terezinha Srs. Aristides e Nair, pelo acesso a área.

A todos estes meu reconhecimento e consideração.

“As conquistas dependem de 50 % de inspiração, criatividade e sonhos,
e 50 % de disciplina, trabalho árduo e determinação. São duas
pernas que devem caminhar juntas”.

Augusto Cury

SUMÁRIO

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	lii
LISTA DE FOTOS	Vi
RESUMO	Vii
ABSTRACT.....	Viii
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
2 OBJETIVOS	3
3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	4
4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDOS	5
5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – MAGNETOMETRIA E SISTEMA GPS DIFERENCIAL	12
6 GEOFÍSICA APLICADA EM ÁREAS COM POTENCIAL MINERAL	21
7 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO	24
8 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
9 CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	53

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos	3
3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	4
4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDOS	5
4.1 Geologia Regional	5
4.1.1 Complexo Estratiforme Básico/Ultrabásico	5
4.1.2 Complexo Metamórfico Vacacaí – Unidade Vulcanossedimentar	6
4.1.3 Formação Rio Bonito	9
4.2 Geologia Local	9
5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – MAGNETOMETRIA E SISTEMA GPS DIFERENCIAL	12
5.1 Fundamentos Teóricos do Método Magnetométrico	12
5.2 Magnetismo e Intensidade Magnética	13
5.3 Campo Magnético e Indução Magnética	13
5.4 Campo Geomagnético e Momento Magnético	14
5.5 Magnetismo dos Materiais e Susceptibilidade Magnética de Rochas e Minerais	16
5.6 Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF)	17
5.7 Metodologia	17
5.8 Geração de Mapas Magnetométricos	18
5.8.1 Transformada Rápida de Fourier e Filtragem dos Dados	18
5.8.2 Sinal Analítico	19
5.8.3 Filtros Gaussianos de Alta Frequência (Residual) e Baixa Frequência (Regional)	19
5.9 Sistema GPS Diferencial	20

6 GEOFÍSICA APLICADA EM ÁREAS COM POTENCIAL MINERAL	21
7 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO	24
7.1 Levantamento Estrutural	24
7.2 Levantamento Magnetométrico e Georreferenciamento	25
7.3 Processamento dos Dados	31
8 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
8.1 Dados Estruturais	33
8.2 Dados Magnetométricos	34
8.3 Dados Geoelétricos Adquiridos em Trabalho Anterior	42
8.4 Análise Integrada dos Dados	44
9 CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	53

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Localização da área de estudos (adaptado de GOOGLE EARTH, 2010)	4
FIGURA 2 – Geologia da área de estudos (adaptado de CPRM, 2000)	8
FIGURA 3 - Representação esquemática do dipolo cujo campo e uma aproximação do campo magnético terrestre (LUIZ & SILVA, 1995)	15
FIGURA 4 - Representação geométrica do campo magnético terrestre e seus elementos. NG-norte geográfico; NM-norte magnético; E-leste (LUIZ & SILVA, 1995)	15
FIGURA 5 - Localização dos perfis magnetométricos sobre os corpos Estratiformes Básicos/Ultrabásicos (adaptado de CPRM, 1995)	21
FIGURA 6 - Princípio do magnetômetro de prótons (LOWRIE, 2007)	26
FIGURA 7 – Principais malhas de amostragem: (a) quadrada. (b) retangular. (c) Radial (MARANHÃO, 1985)	27
FIGURA 8 - Malha de aquisição de dados, com localização da estação base magnetométrica, limites do corpo intrusivo baseado em mapeamento geológico e ponto de coleta de sedimento de corrente com número de pintas de ouro (adaptado de GOOGLE EARTH, 2010)	29
FIGURA 9 - Sistema de aquisição de dados com o GPS Pathfinder Pro-XR (adaptado de TRIMBLE, 2001)	30
FIGURA 10 - Mapa de pontos ou estações de leitura magnetométrica	31
FIGURA 11 - (a) Diagrama com os 219 pontos de medida estrutural. (b) Diagrama estrutural de roseta com atitudes das fraturas ocorrentes em campo N= 219	33
FIGURA 12 - Limite aproximado do Gabro Santa Catarina, com planos de fraturas (PEREIRA, 2011)	34
FIGURA 13 - (A) Mapa de campo magnético total, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa de campo total apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo)	36

FIGURA 14 - Espectro de potência radial médio interpretado	37
FIGURA 15 -(A) Mapa magnetométrico regional, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa magnetométrico regional apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo)	39
FIGURA 16 -(A) Mapa magnetométrico residual, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa magnetométrico residual apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo)	40
FIGURA 17 - (A) Mapa de sinal analítico, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa de sinal analítico apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo)	41
FIGURA 18 - Limite aproximado do Gabro, com planos de fraturas, linhas de caminhamento elétrico e áreas interpretadas com potencial para mineralização (PEREIRA, 2011)	42
FIGURA 19 - Modelo de inversão da resistividade - seção superior e cargabilidade – seção inferior, para a linha 1 (PEREIRA, 2011)	43
FIGURA 20 - Modelo de inversão da resistividade - seção superior e cargabilidade – seção inferior, para a linha 2 (PEREIRA, 2011)	43
FIGURA 21 - Modelo de inversão da resistividade - seção superior e cargabilidade seção – inferior, para a linha 3 (PEREIRA, 2011)	44
FIGURA 22 - Integração de áreas com os altos magnéticos e lineamentos estruturais	45
FIGURA 23 - Cruzamento entre áreas com maior recorrência de altos magnéticos, lineamentos estruturais e áreas de baixa resistividade – alta cargabilidade	47

FIGURA 24 - Diagrama de Log fO_2 x pH para ouro hidrotermal com campos de domínio mineral e áreas de predominância dos resultados geofísicos (Adaptado de ROBB, 2005)	49
---	----

LISTA DE FOTOS

FOTO 1 - Amostra do gabro Santa Catarina parcialmente alterado (Fonte: o autor)	11
FOTO 2 - (a) Medidas estruturais em campo, (b) Afloramento do gabro Santa Catarina (Fonte: o autor)	24
FOTO 3 - Magnetômetro GSM-8 (GEM SYSTEMS, 2008) (Fonte: o autor)	26
FOTO 4 - Aquisições com o magnetômetro móvel (<i>Rover</i>) (Fonte: o autor)	27

RESUMO

Este estudo consiste na aquisição de dados geofísicos por meio da magnetometria terrestre, numa área com indícios de mineralização em ouro e sulfetos, localizada no município de São Sepé, RS. Os dados resultantes da aplicação deste método foram adquiridos com o propósito de estabelecer relações entre os resultados geofísicos, com locais potencialmente mineralizados, a partir de indícios obtidos em prospecção geoquímica de sedimentos de corrente previamente desenvolvidos. O gabro denominado Santa Catarina está intrudido no Complexo Metamórfico Vacacaí, uma sequência metassedimentar onde foram reconhecidas diversas jazidas de ouro. Neste estudo foram realizadas nove linhas de magnetometria terrestre, com 1.200 m de comprimento cada, num total de 10.800 m e 720 estações de leitura. Os produtos magnetométricos gerados foram os mapas de campo total, amplitude do sinal analítico, além dos mapas regional e residual, cujo espectro de potência radial médio permitiu a escolha do intervalo de número de ondas adequado para a separação das componentes em rasas e profundas, posteriormente correlacionados com dados geológicos e estruturais prévios. Os resultados obtidos sugerem que devido a processos metalogenéticos que devem ter controlado a gênese do minério, as anomalias magnéticas são indiretamente relacionadas às mineralizações auríferas.

Palavras-chave: magnetometria, fraturas, mineralização, geoquímica.

ABSTRACT

This study consists of the acquisition of geophysical data by means of terrestrial magnetometry, in an area with evidence of gold and sulfide mineralization, located in the city of São Sepé, in the South of Brazil. The resulting data from the application of this method established a relation between the geophysical results with potential mineralized sites, from evidence obtained in a geochemical prospection of stream sediments that were previously developed. The Santa Catarina gabbro is intruded in the Vacacaí Metamorphic Complex, a metasedimentary sequence where many gold deposits were found. In this study, there were nine lines of terrestrial magnetometry, each one being 1,200 m long, for a total of 10,800 m and 720 reading stations. The magnetometric products generated were, the total field maps, the analytic signal amplitude, and regional and residual maps, in which the average radial power spectrum allowed the selection of the wave number interval, suited for the components separation in shallow and deep, and this was later correlated with geological data and previous studies. The obtained results suggest that due to metalogenetic processes that might have controlled the mineral genesis, the magnetic anomalies were indirectly related to the auriferous mineralization.

Keywords: magnetometry, fractures, mineralization, geochemistry.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Pesquisa mineral é compreendida como a execução de estudos necessários à definição de jazidas, sua avaliação e a determinação da exequibilidade do seu aproveitamento econômico.

Rochas básicas podem conter mineralizações primárias ou secundárias, principalmente por óxidos e sulfetos. Depósitos primários consistem em acumulações relacionadas a segregações que estão ligadas a processos de resfriamento do magma.

Os depósitos secundários podem estar relacionados ao preenchimento de fraturas ou fissuras geradas após a cristalização do magma e a constituição da rocha, proveniente da migração de líquidos residuais ao processo ou originados de processos metamórficos em rochas adjacentes, bem como através de intrusões magmáticas adjacentes (MOON *et al*, 2006).

As ferramentas disponíveis para a prospecção incluem métodos diretos, tais como furo de sondagem, amostragem solo-rocha e análises químicas, além dos métodos indiretos, que compreendem análise de sensores remotos e os métodos geofísicos.

A geofísica permite o estudo das propriedades físicas inerentes aos materiais geológicos, como densidade, radioatividade, condutividade elétrica e magnetização, de forma indireta e, portanto não invasiva. Por meio dos métodos geofísicos é possível detectar contrastes em propriedades físicas, através de medidas com equipamentos de aquisição aérea, terrestre e aquática.

Dentre os diversos métodos geofísicos, a magnetometria apresenta bons resultados, referentes ao mapeamento geológico e delineamento estrutural, e também associações entre domínios magnéticos e possíveis mineralizações.

Levantamentos magnetométricos associados ao reconhecimento geológico e estrutural fornecem informações necessárias para designar possibilidades, confirmar ou refinar modelos, o que auxilia na localização de possíveis estruturas, que podem conter mineralizações. Além disso, podem contribuir para o entendimento dos processos evolutivos que ocorreram numa determinada região.

O alvo do presente estudo é um gabro, classificado no âmbito do Complexo Básico/Ultrabásico no domínio do escudo Sul-Rio-grandense, com litotipos diversos

como gabros, serpentinitos e peridotitos, que podem conter mineralizações em cromo, ouro e sulfetos (CPRM, 1995).

Embora não sejam registrados dados diretos de mineralizações auríferas nos domínios do gabro, dados geológicos e geoquímicos pré-existentes sugerem, para essas áreas, potencialidades referentes à mineralização de ouro e sulfetos associados. Sua gênese provavelmente estaria associada à lixiviação dessas substâncias nas fases de metamorfismo e deformação da encaixante do gabro, bem como sua posterior reconcentração ao longo das zonas de fratura, sob a forma de veios de quartzo e/ou corpos filonianos no âmbito do gabro (CPRM, 1995).

A área de estudos também foi alvo de estudos por métodos geofísicos elétricos (eletroresistividade e polarização induzida), cujos valores medidos em campo, em relação aos parâmetros físicos da resistividade elétrica e da cargabilidade, apresentaram contrastes que permitiram a identificação de áreas com potencial para o acúmulo de minerais metálicos (PEREIRA, 2011).

Do mesmo modo, destaca-se a importância de estudos com outros métodos geofísicos, na referida área, num maior reconhecimento de zonas com potencial para o acúmulo de mineralizações.

Neste trabalho foi empregado o método geofísico da magnetometria, que pode fornecer indicações sobre as propriedades magnéticas em rochas ou depósitos enriquecidos por minerais metálicos, como no caso da área de estudos. Levantamentos estruturais em conjunto com mapas magnéticos, podem evidenciar estruturas internas com vistas a indicar acumulações minerais de interesse econômico.

A seleção deste método geofísico é fundamentada no histórico de aplicações bem sucedidas em diversos estudos de pesquisa mineral. Pesquisas em alvos potencialmente mineralizados em cobre, ouro, urânio, óxidos de ferro, por exemplo, possibilitam detalhamentos por meio de magnetometria, posteriormente confirmados por amostragem e geoquímica. Trabalhos como os de Machado e Penha (1997), Oliveira (2007) e Sultan *et al* (2009), reforçam a eficácia deste método em pesquisa mineral para detalhamento de corpos mineralizados.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo deste trabalho foi o desenvolver estudos de pesquisa mineral num corpo magmático intrusivo por meio de levantamento magnetométrico, reconhecimento geológico e análise estrutural; tentativa de estabelecer relações entre resultados geofísicos com indícios geoquímicos positivos para ouro em sedimentos de corrente, coletados em drenagens provenientes da área de estudos, com locais potencialmente mineralizados no âmbito do corpo intrusivo.

2.2 Específicos

- Caracterizar discontinuidades estruturais como falhas e fraturas no âmbito do gabro, por meio de observações em campo (geologia) e levantamento estrutural, por meio de bússola e análise de imagens de satélite.
- Realizar levantamento magnetométrico terrestre de detalhe, em busca de contrastes relacionáveis a possíveis acumulações minerais.
- Definir o contato aproximado do corpo intrusivo com a rocha encaixante, em termos de altos magnéticos.
- Análise integrada de dados estruturais e geofísicos na tentativa de estabelecer correlação entre anomalias magnéticas e famílias de fraturas, num contexto de depósitos filonianos de ouro e sulfetos.
- Cruzar os dados geofísicos obtidos neste trabalho com resultados de métodos geoeletricos realizados em estudo prévio, para o auxílio nas interpretações.

3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos está localizada na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, especificamente no município de São Sepé, distante cerca de 270 km da capital Porto Alegre. Cituada à 6 km ao norte da Vila Cerrito do Ouro, acessada por estrada não pavimentada, com coordenadas geográficas centrais 30°19'06,20" Sul e 53°39'12,12" Oeste (Figura 1).

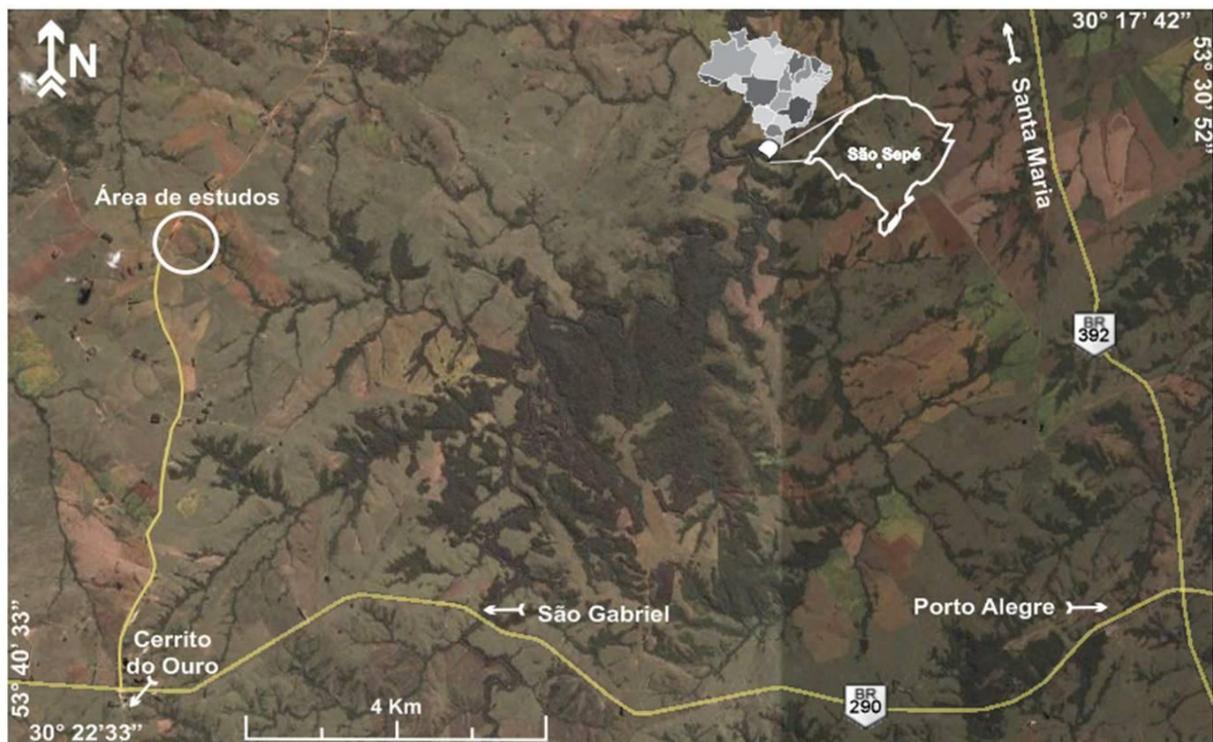


Figura 1 - Localização da área de estudos (adaptado de GOOGLE EARTH, 2010)

4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDOS

4.1 Geologia Regional

A área de estudos está inserida na bacia do Camaquã, que engloba as áreas do Escudo Sul-rio-grandense. Este compreende rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, de idade, origem e evolução diversas. É caracterizado por uma compartimentação em blocos limitados por grandes falhamentos regionais de direção NE-SW (CPRM, 1995).

O contexto geológico da bacia do Camaquã é altamente complexo, com registro estratigráfico que compreende rochas sedimentares de origem marinha, aluvial e eólica, bem como rochas vulcânicas e vulcanoclásticas de composições variadas. Os sucessivos eventos tectônicos responsáveis pela formação e deformação das bacias deposicionais sucedidas, reunidas nesta, contribuem para esta complexidade (BORBA, 2006).

A bacia do Camaquã, geneticamente relacionada aos processos tectono-magmáticos tardios do Cinturão Dom Feliciano, é compreendida como um lócus deposicional onde foi preservado o registro da superposição de diversos tipos de bacias sedimentares, com características geológicas próprias e mecanismos de subsidência distintos (PAIM & LOPES, 2000).

4.1.1 Complexo Estratiforme Básico/Ultrabásico

O Complexo Estratiforme Básico/Ultrabásico inserido na bacia do Camaquã é representado na região pelo gabro Mata Grande, maciço Pedras Pretas e gabro Santa Catarina, atribuídos ao Proterozóico inferior.

O gabro Santa Catarina estabelece relações de contato com as rochas da Unidade Metavulcanossedimentar, que o envolve. Está mascarado pelo manto de intemperismo e pela cobertura de arenitos da formação Rio Bonito na porção sul. É possível supor que este gabro constitua uma janela tectônica de um embasamento mais antigo, onde estão alojadas as rochas da Unidade Metavulcanossedimentar.

No corpo Santa Catarina, o termo ultrabásico é raro, manifestado por esporádicas ocorrências de blocos de rochas piroxeníticas. Porém a associação de termos básicos é dominante em rochas gabroicas. A rocha gabroica é constituída

por plagioclásios, piroxênios e minerais opacos e pode conter outros bens minerais, tais como cromo, ouro e sulfetos. O gabro Santa Catarina e o maciço Pedras Pretas, ocupam uma área de aproximadamente 0,8 Km² e 2,5 Km², respectivamente.

As duas associações representadas na unidade do complexo apresentam composições distintas: rochas ultrabásicas e básicas. A primeira está bem exposta na porção centro-norte do maciço Pedras Pretas. Corpos menores de rochas ultrabásicas ocorrem nas porções noroeste e sudeste do mesmo (CPRM, 1995).

Os litótipos que compõem a geologia na região da área de estudos, bem como as principais formações, podem ser observados no mapa (Figura 2).

No gabro Santa Catarina a mineralogia é composta por plagioclásio (45% a 80%), piroxênio (5%), minerais opacos (5%), apatita (2%), quartzo (0% a 7%), feldspato alcalino (traços) e zircão (traços). A mineralogia secundária está representada por anfibólio (30% a 50%), epidoto (5%), clorita (10%), sericita, carbonato e opacos secundários. Em ambos os corpos, as rochas básicas são equigranulares, com textura predominantemente cumuláticas (CPRM, 1995).

O mineral opaco mais frequente é a ilmenita, além de magnetita, pirrotita, pirita e calcopirita; espinélio e rutilo (RÊGO, 1981). Os opacos aparecem disseminados na matriz ou concentrados junto aos ferromagnesianos. Os minerais secundários mais importantes são o quartzo e a apatita.

Nas rochas gabraicas, tanto do maciço Pedras Pretas como do gabro Santa Catarina, são comuns as transformações dos piroxênios e olivinas, com a substituição e formação de coroas de reação constituídas de tremolita-actinolita e cummingtonita. Essas transformações metamórficas, em graus variáveis sobre os piroxênios, são mais intensas no gabro Santa Catarina, e evidenciam, condições intermediárias de metamorfismo entre as fácies xisto-verde e anfibolito (CPRM, 1995).

4.1.2 Complexo Metamórfico Vacacaí – Unidade Vulcanossedimentar

Esta unidade compreende uma associação de rochas vulcânicas, vulcanoclásticas e sedimentares, metamorfizadas na fácies xisto-verde, que na literatura é designado de Vacacaí que são associações de filitos, quartzitos, mármore, anfibólio xistos e clorita xistos, juntamente com sequências magnesianas. Este evento intrusivo é atribuído ao Proterozoico Superior (CPRM, 1995).

Caracterizado por uma evolução tectônica multifase, nesta Unidade Metavulcanossedimentar é possível discernir quatro fases de deformação.

As três primeiras (D1, D2 e D3), geraram dobras com tendência à coaxialidade com direção axial NE-SW, e estão relacionadas com esforços compressivos dirigidos para SE, sendo que D1 e D2 refletem uma movimentação tangencial, enquanto que D3 é caracterizada como associada a uma fase de transcorrência. A quarta fase de deformação (D4) gerou dobras com orientação axial NW-SE, resultante de uma drástica reorientação no regime de tensão global do Escudo Sul-Rio-Grandense (CPRM, 1995).

A fase de deformação D1 foi responsável pelo dobramento e transposição do acamadamento das Unidades Metavulcanoclástica e Metapelítica que constituem a Unidade Metavulcanossedimentar. A fase de deformação D2 resultou em um expressivo transporte de massas de noroeste para sudeste, evidenciados pelos imbricamentos tectônicos que caracterizam o arranjo estrutural entre as diversas associações metamórficas na região. O caráter alóctone das associações metamórficas é indicado pelos seguintes aspectos estruturais: Complexo Gnáissico, Complexo Metamórfico Básico/Ultrabásico e Unidade Metavulcanossedimentar.

A fase de deformação D3 é responsável pelo redobramento coaxial e geração de dobras do tipo normal, com eixos de caimento moderado, ora para NNE, ora para SW. De maneira geral, são dobras abertas, frequentemente de tendência monoclinal, com os francos inclinados com mergulho para NW.

As dobras geradas na fase de deformação D4 estão caracterizadas por apresentarem eixos com orientação próxima da ortogonalidade em relação às estruturas estabelecidas nas fases anteriores. Apresenta dobras suaves, de dimensões decimétricas, representadas por ondulações da foliação metamórfica, que constituem dobras de flanco, ou seja, dobramentos super impostos aos limbos das estruturas das fases anteriores (CPRM, 1995).

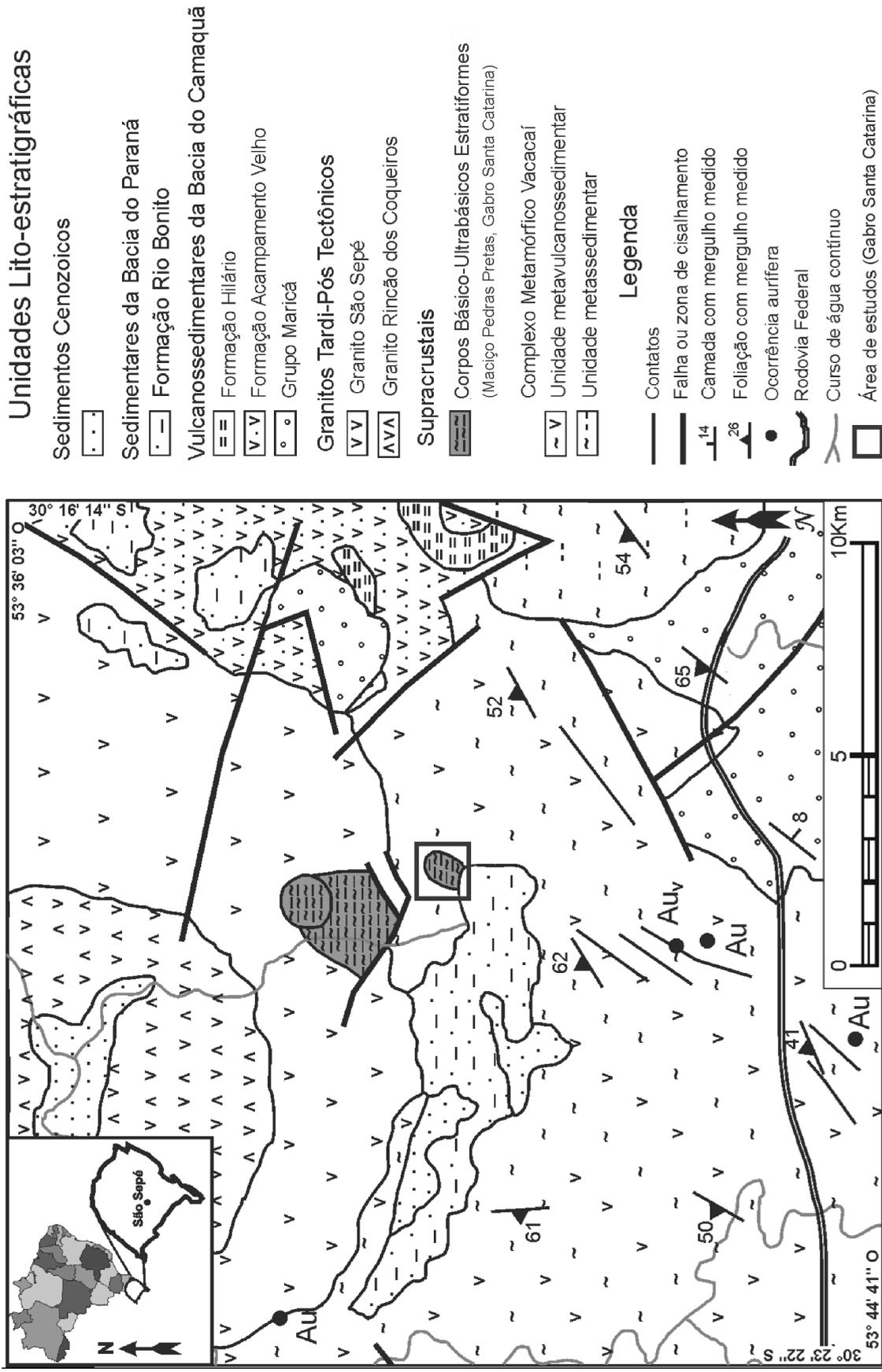


Figura 2 – Geologia da área de estudos (Adaptado de CPRM, 2000).

4.1.3 Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito está inserida na cobertura da bacia do Paraná e ocorre nas porções sul e sudoeste em contato com o gabro Santa Catarina, por meio de exposições descontínuas. Sua área de exposição está coberta por depósitos aluviais arenosos, resultantes de retrabalhamento de rochas da própria unidade. Em geral, dominam amplamente os arenitos quartzosos, com esporádicas intercalações de siltitos, subjacentes ao pacote arenítico. É possível observar em raríssimas exposições nos vales, siltitos argilosos e siltitos carbonosos com intercalações de camadas de carvão. Esta formação é atribuída ao Permiano Inferior (CPRM, 1995).

A interpretação paleoambiental sugere que a partir de terras mais elevadas situadas a SW da área, prevaleceram condições para a formação de depósitos de leque aluvial, representados pelos paraconglomerados de grânulos com matriz argilosa. Algum tempo depois, implantou um sistema fluvial tipo entrelaçado, que retrabalhou o material aluvial preexistente e provocou um recuo do relevo. Esta caracterização advém pela ocorrência de arenitos com estratificação cruzada acanalada, presentes na porção média dos furos descritos.

Em áreas de baixo relevo, desenvolveu um ambiente lacustre/pantanososo em que, além de sedimentação fina de águas calmas, com laminação plano-paralela, acumularam turfeiras, que formaram camadas de carvão, atingindo espessuras consideráveis (até 4,5 m), como registrado pelos furos realizados no âmbito da folha Passo do Salsinho (CPRM, 1995).

4.2 Geologia Local

O trabalho de Rêgo (1981) distingue no Complexo Estratiforme Básico/Ultrabásico uma porção constituída por rochas de composição dunítica, peridotítica, piroxenítica, gabroica até anortosítica, serpentinizadas em proporções variáveis (ultrabásicas); e uma porção básica que inclui gabros, leucogabros e anortositos (Proterozoico inferior). O gabro Santa Catarina foi descrito originalmente por Rodrigues *et al* (1982), em trabalho de graduação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os autores dos trabalhos supracitados recomendam novos estudos na área para avaliação de eventuais mineralizações.

Mineralizações filonianas de ouro estão representadas na região por jazimentos caracterizados por associações de filões de quartzo com ouro e pequenas proporções de óxidos de ferro, pirita e calcopirita. Os filões apresentam direções NE e NW e estão preferencialmente encaixados em litotipos da unidade Metavulcano-Sedimentar, subconcordantes ou discordantes em relação à estruturação geral.

A área de estudo é coberta pelo Programa de Levantamentos Básicos Geológicos (PLGB) Passo do Salsinho, que consiste num estudo em termos geológicos, geofísicos, geoquímicos e metalogenéticos em escala 1:50.000, que abrange os municípios de Caçapava do Sul, São Sepé e Vila Nova do Sul no Estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 1995).

Um estudo geoquímico à aproximadamente 1 km a jusante, do centro do gabro Santa Catarina, em amostra de sedimento de corrente coletados num rio que tem sua nascente no gabro, registrou 48 pintas de ouro, além de elementos anômalos como o arsênio e cobre para a região do gabro, bem como pirita, em conjunto com minerais pesados (CPRM, 1995).

Dados geológicos e geoquímicos pré-existentes indicam potencialidades de mineralizações de ouro e sulfetos associados no âmbito do gabro Santa Catarina.

A correlação entre pintas de ouro em sedimentos de corrente e resultados geoeletricos prévios condizentes com zonas sulfetadas, permitiu a proposição de possibilidade de origem da anomalia geoquímica.

Este trabalho motivou a continuidade de estudos na área, com a proposta de investigações por meio do método da magnetometria, a fim de avaliar diversos aspectos, dentre os quais a continuidade lateral de filões potencialmente mineralizados em ouro e hipóteses metalogenéticas.

As rochas da área de estudos ocorrem sob a forma de matações arredondados, normalmente de dimensões de 0,5 m a 1 m de diâmetro, raramente atingem 2 m de diâmetro, espalhados na superfície do terreno. As características do afloramento dificultam a visualização de estruturas magmáticas primárias; esporadicamente nos leucogabros é perceptível um fino bandamento, irregular e descontínuo, representado pela concentração de minerais máficos, em níveis de espessura milimétrica.

Com o reconhecimento geológico em campo foi possível observar exposições do gabro Santa Catarina. Em uma amostra da rocha gabroica coletada no local, é

possível observar uma textura fanerítica e equigranular, com grãos escuros e claros, além de uma evidente alteração dos minerais ferromagnesianos (Foto 1).

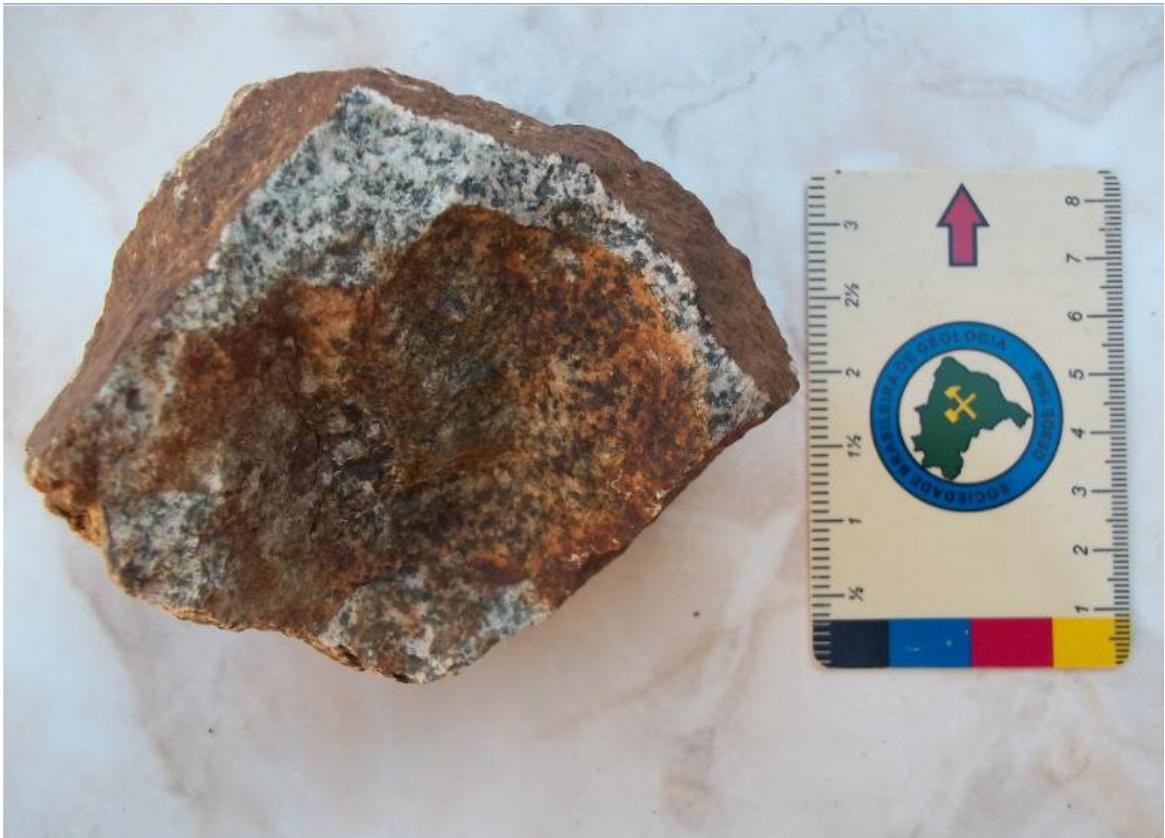


Foto 1 – Amostra do gabro Santa Catarina parcialmente alterado (Fonte: o autor).

A coloração verde e preto observada na amostra coletada em campo (foto 1), corresponde ao grupo de piroxênios que são um dos formadores da rocha. A coloração dos piroxênios está, principalmente, na dependência do ferro. Quanto maior a quantidade desse elemento mais acentuada será a cor.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – MAGNETOMETRIA E SISTEMA GPS DIFERENCIAL

5.1 Fundamentos Teóricos do Método Magnetométrico

O método da magnetometria é baseado no estudo das variações locais do campo magnético terrestre, provenientes da existência de materiais geológicos ou antrópicos, que apresentam contraste de amplitude do campo magnético, tais como rochas básicas e ultrabásicas. É um método classicamente aplicado em trabalhos de prospecção e pesquisa mineral, desde etapas regionais que abrangem amplas áreas sob a forma de aerolevantamentos ou de detalhamento por meio de levantamentos terrestres.

Cada rocha é magnetizada de acordo com a sua susceptibilidade magnética, que depende da quantidade e do modo de distribuição dos minerais magnéticos presentes. A concentração de minerais magnéticos produz distorções locais no campo magnético terrestre, que podem ser detectadas e fornecem informações da subsuperfície acerca, por exemplo, da presença de ocorrências minerais potencialmente econômicas.

Medidas mais precisas da intensidade do campo magnético e das suas componentes são efetuadas, com equipamentos denominados de magnetômetros. Os levantamentos magnéticos podem ser realizados em terra, no mar e no ar. Geralmente a intensidade do campo magnético é medida em nanotesla (nT) do sistema internacional (SI), onde 1 nT corresponde a 10^{-9} T.

Variações do campo geomagnético principal são produzidas, em maior ou menor intensidade, em razão da presença de minerais magnéticos nas rochas. Os principais minerais magnéticos são a magnetita, a pirrotita e a ilmenita. Estes podem fornecer informações sobre a distribuição de minerais não magnéticos que são economicamente importantes, tais como a calcopirita, galena, asbesto e calcocita. Além de permitir a localização de minerais economicamente importantes, as medidas magnéticas podem ainda ser usadas na identificação de contatos geológicos e estruturais, como falhas e dobras (LUIZ & SILVA, 1995).

5.2 Magnetismo e Intensidade Magnética

A Terra pode ser entendida como um grande ímã, onde os polos magnéticos possuem excesso de carga magnética, semelhante ao que ocorre nas extremidades dos ímãs (carga positiva na extremidade norte e negativa na extremidade sul). Essas cargas são tidas como fonte do campo magnético externo ao ímã, em analogia às cargas elétricas que acumulam nas extremidades de um material eletricamente polarizado e são responsáveis por um campo elétrico externo ao material.

Resultados de experimentos eletromagnéticos demonstram que campos magnéticos podem ser observados sempre que correntes elétricas fluem através de condutores, como um cabo elétrico (KEAREY *et al*, 2002).

O princípio do método magnetométrico envolve a medida do campo magnético da Terra, por meio de seus elementos vetoriais e apesar da ausência de monopolos magnéticos, esta simplificação da teoria magnética facilita o entendimento destes princípios. Os princípios do método são baseados na Lei de Coulomb que expressa que uma força (f) que atua entre dois polos magnéticos de intensidade p_1 e p_2 , separados por uma distância (r):

$$F_{(r)} = k \frac{p_1 p_2}{r^2}$$

Sendo k a constante de proporcionalidade magnética (LOWRIE, 2007).

5.3 Campo Magnético e Indução Magnética

O campo magnético (H) é definido como a intensidade associada a um polo magnético (p_1), devido à presença no espaço de outro polo magnético estimado, onde: p_1 é um polo magnético ilusório no espaço onde o sensor está situado. No instante em que um material qualquer é submetido ao efeito do campo H , ele adquire uma intensidade de magnetização ou imantação M , proporcional ao campo, dada por:

$$M = kH$$

O fator de proporcionalidade k é uma propriedade física do material, denominada de susceptibilidade magnética (LOWRIE, 2007).

A magnetização de um material por um campo externo (indutor) ocorre através do alinhamento dos momentos dos dipolos internos ao material. Estes momentos se alinham devido à existência de um campo magnético interno chamado campo molecular. Esse alinhamento provoca o aparecimento de um campo adicional que, somado ao campo externo H , produz um campo conhecido por indução magnética (LUIZ & SILVA, 1995).

O campo indução magnética B é relacionado ao campo magnético H , da seguinte forma:

$$B = \mu H$$

sendo $\mu = (1 + k)$ a permeabilidade magnética do material (LOWRIE, 2007).

5.4 Campo Geomagnético e Momento Magnético

Medidas efetuadas na superfície da Terra sugerem que o campo geomagnético pode ser aproximado pelo campo produzido por um momento de dipolo localizado no seu centro. Este momento aponta para o polo sul geográfico, localizado sobre um eixo que forma um ângulo de aproximadamente $11,5^\circ$ com o eixo de rotação da Terra (Figura 3).

O campo geomagnético \vec{F}_0 é caracterizado em qualquer ponto da superfície terrestre por elementos específicos (Figura 4).

Sendo: (\vec{F}_h) a componente horizontal, (\vec{F}_z) a componente vertical, (i) o ângulo de inclinação com o plano horizontal, (D) o ângulo de declinação, formado entre \vec{F}_h e a direção do norte geográfico (marcado a partir dessa última). A componente horizontal pode ser decomposta em duas outras: \vec{F}_x , na direção do norte geográfico, e \vec{F}_y , na direção do leste geográfico. O campo magnético \vec{F}_0 , as

componentes \vec{F}_h e \vec{F}_z , assim como a inclinação i estão em um mesmo plano vertical.

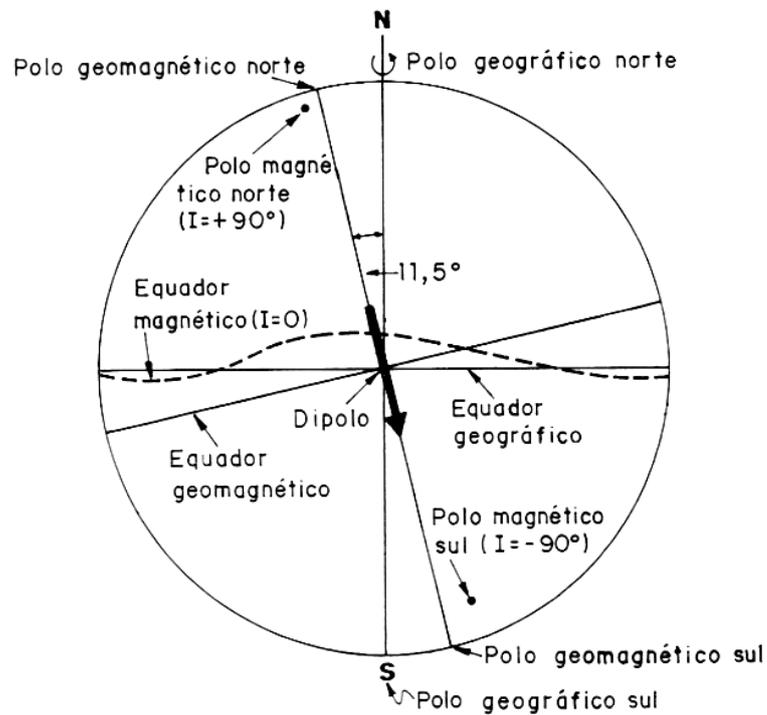


Figura 3 – Representação esquemática do dipolo cujo campo e uma aproximação do campo magnético terrestre (LUIZ & SILVA, 1995).

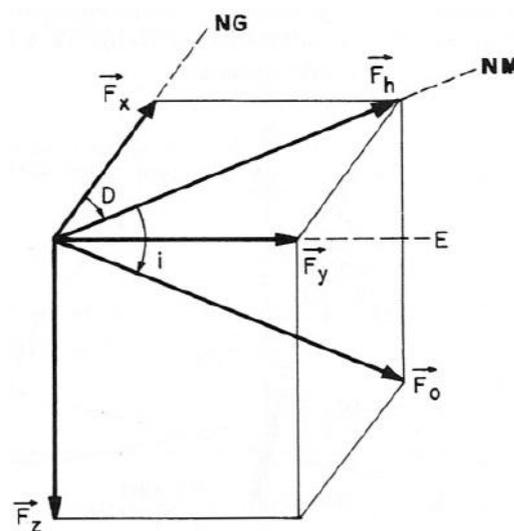


Figura 4 - Representação geométrica do campo magnético terrestre e seus elementos. NG-norte geográfico; NM-norte magnético; E-leste (LUIZ & SILVA, 1995).

O momento magnético de um material é resultante do movimento feito pelos elétrons que estão nos átomos deste material. Portanto, é possível classificar os materiais de acordo com seu comportamento no meio magnetizado em: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos ou ferrimagnéticos (KEAREY *et al*, 2002).

A magnetização em rochas pode ser de dois tipos: magnetização induzida, provocada pelo campo magnético atual da Terra e a magnetização remanescente, adquirida durante a formação da rocha (TELFORD *et al*, 1990).

5.5 Magnetismo dos Materiais e Susceptibilidade Magnética de Rochas e Minerais

Os materiais e substâncias terrestres não apresentam o mesmo comportamento magnético quando submetidos a um campo magnético. Assim, é possível observar que:

- Algumas substâncias podem ser atraídas e outras repelidas.
- A força de atração ou repulsão não é mais intensa no centro do cilindro, onde o campo tem a máxima intensidade, mas nas proximidades das suas extremidades.
- A intensidade da força varia de algumas dezenas de dinas (unidade de medida para representação de força), positiva no caso da atração e negativa na repulsão, até valores superiores a 100.000 dinas, depende do tipo de substância.

As substâncias que são repelidas por ação do campo magnético são denominadas de diamagnéticas, enquanto as que são atraídas recebem a denominação de paramagnéticas. Estas últimas, sob certas condições, podem apresentar magnetização espontânea e estão associadas aos maiores valores de atração. Neste caso, elas passam a ser denominadas de substâncias ferromagnéticas (LUIZ & SILVA, 1995).

Nas rochas a susceptibilidade magnética, depende principalmente, da quantidade, tamanho dos grãos e modo de distribuição dos minerais ferromagnéticos nelas contidos. Os minerais ferromagnéticos ocorrem nas rochas comumente na forma de grãos finos dispersos em uma matriz de minerais paramagnéticos e diamagnéticos, representada pelos silicatos (TELFORD *et al*, 1990).

5.6 Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF)

O IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) define o campo magnético teórico não perturbado em qualquer ponto da superfície terrestre, utilizado para a definição de perturbações causadas no campo normal por estruturas geológicas e depósitos de minérios, isto é, como referência para a definição das anomalias magnéticas que causam perturbações no campo normal da Terra (KEAREY *et al*, 2002).

Para gerar o IGRF, o campo magnético terrestre é representado por um somatório de harmônicos esféricos, cujos coeficientes são determinados a partir de medidas magnéticas realizadas sobre todo o planeta, por meio de levantamentos terrestres, marinhos e aéreos.

Alguns efeitos produzidos pelo campo magnético externo como a variação diurna e as tempestades magnéticas são importantes em estudos de prospecção magnetométrica.

As variações diurnas representam flutuações magnéticas com período de 24 horas, que variam com a latitude e a estação do ano. Esta variação é controlada provavelmente pela ação do vento solar e correntes na ionosfera (TELFORD, 1990).

As tempestades magnéticas afetam severamente o trabalho de prospecção magnética e estão relacionadas às emissões intensas de plasma solar e à sua interação com o campo principal da Terra (LUIZ & SILVA, 1995).

Em levantamentos em escala de detalhe (1:2000 ou menores, segundo Maranhão, 1985), como a área do presente estudo, um único valor de IGRF, foi tomado para o centro da área. Em áreas mais extensas é necessário o uso de diferentes valores de IGRF.

5.7 Metodologia

Os principais procedimentos para o tratamento dos dados magnetométricos realizados neste trabalho foram: correção da variação diurna, remoção do IGRF e a filtragem dos dados.

As correções são realizadas para eliminar as variações devidas a causas não geológicas, como a variação diurna e o desnível dos pontos de amostragem. As

filtragens são aplicadas para eliminar efeitos geológicos indesejáveis, para realce e reconhecimento de feições relevantes.

O procedimento empregado na correção da variação diurna consistiu na utilização dos dados de dois magnetômetros, onde um deles registra o campo magnético em diversos pontos da área de estudos (*Rover*), e outro fixo posicionado nas proximidades para as medidas da variação diurna, com registro de horário das medidas (base). A correção é realizada com a combinação de leituras do magnetômetro móvel com a unidade base, para o momento da medida.

O IGRF é um modelo matemático, já definido, do campo principal ou normal da Terra e suas variações temporais. O campo normal é representado pelo IGRF e seus valores podem ser encontrados em tabelas e mapas ou gerados em computadores por algoritmos matemáticos.

5.8 Geração de Mapas Magnetométricos

5.8.1 Transformada Rápida de Fourier e Filtragem dos Dados

A filtragem é uma operação matemática que procura mudar uma série de dados para enfatizar feições de interesse, enquanto suprime as de caráter indesejável ou ruidosas.

A transformada de Fourier proporciona diferentes e amplas aplicações de filtragens, em dados aplicados em estudos e investigações na área das ciências da Terra, como no caso de dados gerados pelo método da magnetometria. Antes da aplicação da transformada de Fourier é necessário a criação de um *grid* inicial, de maneira que atenda às seguintes propriedades: seja quadrado, tenha dimensões aceitáveis ao procedimento da transformada de Fourier e não possua amostragens irreais (*dummies*) (GEOSOFT, 2005).

A transformada rápida de Fourier é um método que decompõe o sinal dentro de uma série de funções senos e cossenos de diferentes frequências. A transformada de Fourier pode ser calculada rapidamente em computadores, com a utilização de algoritmos baseados nesta transformada, sendo o mais conhecido denominado de transformada rápida de Fourier, em inglês *fast Fourier transform*, ou FFT.

Neste trabalho, foi obtido o mapa de campo magnetométrico total e a partir deste o mapa de sinal analítico, assim como os mapas resultantes da aplicação do filtro gaussiano de alta e baixa frequência.

5.8.2 Sinal Analítico

O sinal analítico é formado por uma combinação de gradientes horizontais e verticais de uma anomalia magnética. Segundo Nabighian *et al* (2005), uma importante característica do sinal analítico é que ele independe da direção de magnetização da fonte. A amplitude do sinal analítico está simplesmente relacionada com a amplitude de magnetização. Nabighian *et al* (2005) também mostraram que o sinal analítico direciona para os limites do corpo magnético. A imagem do sinal analítico determina parâmetros geométricos, como localização de limites (geológicos e estruturais), profundidade dos corpos, com o realce dessas estruturas (anomalias).

As amplitudes do sinal analítico apresentam como sua principal característica, o posicionamento das anomalias magnéticas resultantes imediatamente acima dos limites da estrutura.

5.8.3 Filtros Gaussianos de Alta Frequência (Residual) e Baixa Frequência (Regional)

Para a separação das componentes regional e residual foi aplicado um filtro gaussiano, que funciona como uma passa-banda. Porém, os dados de saída apresentam uma distribuição gaussiana (normal), e o ponto de corte escolhido é o desvio padrão da função gaussiana (OLIVEIRA, 2008).

Antes da aplicação desse filtro, após o pré-processamento, foi gerado o espectro de potência radial médio dos dados. A sua análise permitiu a escolha dos intervalos de número de ondas adequados para a separação das componentes em rasas e profundas. Esse número de onda corresponde a um ponto onde a curva do espectro, aproximada por retas, corresponde à junção da reta, cujos parâmetros (inclinação e intercepto) correspondem às componentes espectrais.

Para o presente estudo foi obtido comprimento de onda maior e menor que 6 (número de onda por unidade de medida).

5.9 Sistema GPS Diferencial

Para a coleta da posição geográfica das estações de leitura no levantamento de campo, deste trabalho, foi utilizado um receptor Pathfinder Pro XRS que inclui um GPS Diferencial (DGPS). O DGPS, com software de controle *Trimble* é um sistema ideal para toda a coleta de dados precisos para utilitário, urbano e bancos de dados de recursos naturais.

O sistema DGPS, permite a obtenção da posição exata, o que torna os dados coletados mais confiáveis. Este sistema permite a utilização de dados do sistema de informações geográficas SIG (*Geographic Information System*) existentes, o que possibilita que decisões tomadas no SIG possam ser baseadas nos dados atuais, mais precisos e confiáveis disponíveis.

A fundação dos receptores de sistema DGPS é um posicionamento preciso. O DGPS utilizado neste estudo, conta com 12 canais de monitoramento contínuo via satélite. Após a correção diferencial, que é realizada com os dados obtidos na área de estudos e os fornecidos pela estação base conhecida é possível chegar a uma precisão submétrica, ou seja, inferior a um metro (TRIMBLE, 2001).

O sistema DGPS requer dois receptores ou mais. Um receptor é denominado de estação de referência, que fica localizado em um ponto conhecido, com localização precisa de latitude, longitude e altitude. Os receptores conhecidos como móvel (*rover*), utilizados na coleta de dados em determinada área, nas proximidades da estação de referência. Os erros ou distorções, das medidas inerentes ao sistema, são corrigidos após ou durante o processamento dos dados.

Existem alguns fatores que limitam a qualidade dos dados obtidos com o receptor DGPS. Sinais diferenciais de satélite visualizados pelo leitor podem ser bloqueados pela presença de alguns elementos na área de estudo, como árvores e montanhas.

Entre outros fatores que podem afetar a precisão do DGPS, estão o número de satélites captados ou visíveis no momento da leitura, sinais refletidos que são causados por fontes metálicas que não são inerentes à área e à distância entre o receptor móvel (*rover*) e a estação base conhecida.

6 GEOFÍSICA APLICADA EM ÁREAS COM POTENCIAL MINERAL

Vários trabalhos podem ser encontrados na literatura, que relatam a utilização de métodos geofísicos em estudos de prospecção mineral, em especial o método da magnetometria terrestre ou aérea.

Em trabalho desenvolvido pela Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (1995), foi realizado um levantamento geofísico no âmbito do Complexo Básico/Ultrabásico Estratiforme, que compreende o maciço Pedras Pretas e o gabro Santa Catarina, que foram caracterizados por seis perfis magnetométricos, com o objetivo preliminar de definir o formato de ambas as intrusivas (Figura 5).

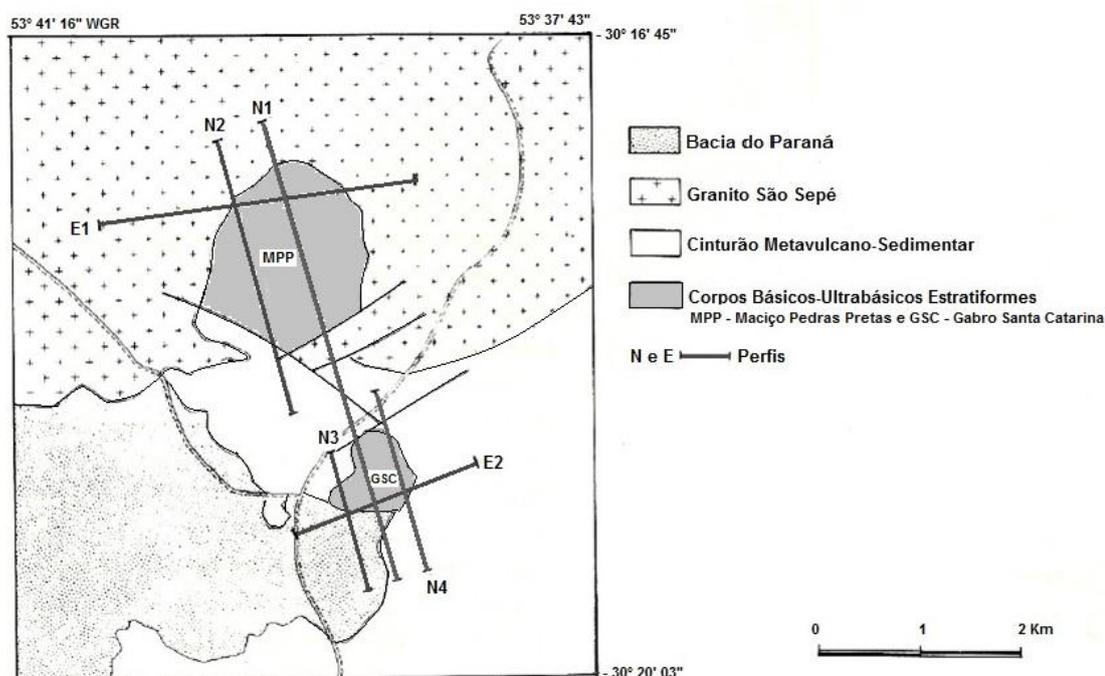


Figura 5 – Localização dos perfis magnetométricos sobre os corpos Estratiformes Básicos/Ultrabásicos (adaptado de CPRM, 1995).

O estudo de Pereira (2011) apresenta os resultados da aplicação dos métodos geofísicos da polarização induzida e eletrorresistividade, de forma conjunta com análise estrutural, por imagens de satélite. Os modelos de inversão obtidos permitem a associação entre áreas de baixa resistividade e alta cargabilidade, o que indica as áreas potencialmente mineralizadas. Os resultados do trabalho em questão são apresentados no capítulo 8 e posteriormente serão correlacionados com os dados de magnetometria obtidos neste estudo.

O trabalho de Sharma (1986) analisou o desenvolvimento do uso de pesquisas magnetométricas em exploração mineral, a partir da análise e discussão de diversos estudos prévios. O autor destaca alguns dos contextos geológicos de relevância para estudos de prospecção mineral, como a forma de cinturões vulcanossedimentares, fortemente metamorfizados e terrenos de litologias antigas. O reconhecimento e interpretação de falha, corte e fratura, não só como hospedeiros potenciais para uma variedade de minerais, mas também como um guia indireto a epigenética, stress relacionado a mineralização nas rochas circundantes, além da identificação e delimitação de intrusivas pós-tectônicas. Tais objetivos são típicos de zonas sieníticas, complexos carbonáticos, kimberlitos, granitos e máficas intrusivas.

O estudo de Oliveira (2007) apresenta resultados da integração de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos na região central do estado do Ceará. O objetivo foi o mapeamento geológico, além da pesquisa geológica regional de cromita e problemas tectono-estruturais. A área de estudos é representada pelo Complexo Cruzeta, Mombaça, Ceará e granitóides proterozóicos. Os jazimentos de cromita estão presentes em lentes de rochas metaultramáficas, intercaladas na sequência vulcano-sedimentar da Unidade de Tróia, a noroeste da região de Mombaça. Os resultados permitiram estabelecer três áreas anômalas na região de Mombaça, correlacionáveis com várias feições geológicas e tectônicas, além de mineralizações em cromita.

Em pesquisa geofísica para ouro e minerais associados, efetuada no Egito, Sultan *et al* (2009) aplicaram os métodos da magnetometria, potencial espontâneo, polarização induzida e eletrorresistividade, com o propósito de dimensionar depósitos minerais localizados em zona de cisalhamento recoberta por *gossans*. A parte nordeste da área ocupada pelas elevadas anomalias magnéticas está relacionada com os corpos de minério. A interpretação conjunta dos dados geofísicos indica que a estruturação NW-SE pode estar associada com os depósitos de minério em diferentes profundidades. Os resultados da interpretação magnética indicaram que a profundidade estimada de uma faixa do depósito de minério é de 35,9 m para 52,7 m e intervalos de 27,2 m para 87,8 m. Os resultados apresentados neste estudo indicam que os altos teores de ouro estão associados com uma função linear superficial que é identificada por diferentes métodos geofísicos.

O trabalho desenvolvido por Machado & Penha (1997) aborda a aplicação da geofísica terrestre (magnetometria e radiometria) como ferramenta de apoio ao

mapeamento geológico em uma área de pesquisa mineral na Serra do Espinhaço, estado de Minas Gerais. A integração de dados de geologia e geofísica permitiu definir quatro zonas, das quais a terceira é a mais favorável para conter mineralizações auríferas. Esta zona está relacionada à sequência vulcanossedimentar do Rio Mata Cavalo, caracterizada por uma expressiva anomalia do campo magnético total em xistos máficos e ultramáficos com lentes de formações ferríferas (ricas em magnetita) e filitos carbonosos negros. Esta zona hospeda as mais importantes anomalias geoquímicas de ouro conhecidas na área em estudo.

O trabalho de Suárez *et al* (2012) apresenta o estudo geológico e geofísico magnetométrico do corpo máfico-ultramáfico de Las Cañas, província de San Luis, Argentina. Esta rocha consiste num corpo intrusivo e alongado e 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 elementos do grupo da platina. As características geoquímicas indicam dois grupos de rochas, com valores máximos entre 2ppb e 22ppb de Pt e Pd. Os resultados demonstram coincidência entre anomalia magnética na zona mineralizada em setores ultramáficos, com picos positivos e negativos de 1.955nT e -480nT próximos entre si. Contrastes de aproximadamente 500nT caracterizam altos magnéticos sem mineralização, enquanto que as rochas metamórficas encaixantes, raramente excedem 100nT de amplitude.

7 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

Neste capítulo são descritos os procedimentos de aquisição e tratamento de dados estruturais e magnetométricos, critérios de amostragem, malha de aquisição e georreferenciamento de estações de leitura.

7.1 Levantamento Estrutural

Este levantamento consistiu na realização de 219 medidas estruturais de direção e ângulo de mergulho em fraturas dentro dos limites do gabro Santa Catarina, com o uso da bússola tipo Brunton (Foto 2). A partir da análise de sensores remotos, foi possível constatar que a área de estudos é bastante estruturada, com drenagens fortemente orientadas.

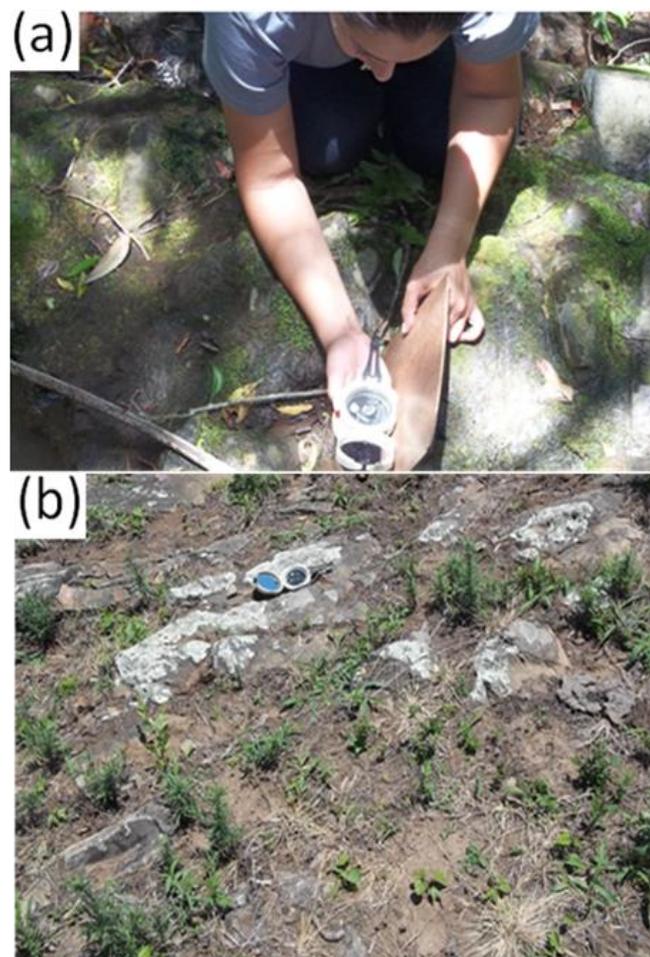


Foto 2 – (a) Medidas estruturais em campo, (b) Afloramento do gabro Santa Catarina (Fonte: o autor).

Informações obtidas a partir de dados estruturais e deformacionais reunidos no PLGB Passo do Salsinho revela que a região de estudos foi submetida a quatro fases de deformação. Em contrapartida, descrições petrográficas realizadas em amostras provenientes do gabro Santa Catarina indicam o predomínio de minerais tipicamente formadores de rocha, como feldspatos, magnetita, quartzo e acessórios. A assembléia mineral descrita para a área aponta para a ausência de minerais de minério, como ouro ou sulfetos, na matriz da rocha.

Desta forma, a possível remobilização de ouro e sulfetos provenientes dos litotipos do Complexo Metamórfico Vacacaí durante os sucessivos eventos deformacionais e a existência de um pronunciado padrão estrutural no âmbito do gabro, pode ser indicativo de eventos deformacionais contemporâneos e de mineralização filoniana em fraturas.

Neste sentido, o levantamento estrutural e sua posterior análise em conjunto com dados geofísicos são fundamentais para compreensão do modelo metalogenético e seus desdobramentos em termos prospectivos.

7.2 Levantamento Magnetométrico e Georreferenciamento

Neste trabalho foi utilizado um magnetômetro do tipo precessão nuclear ou 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 (Figura 6A). Os núcleos de prótons agem como pequenos dipolos, alinhados em paralelo ao campo geomagnético.

A bobina é submetida a uma corrente que gera um campo magnético, 50 a 100 vezes maior que o campo geomagnético, e numa direção diferente, com alinhamento de prótons nesta nova direção (Figura 6B). A corrente é desligada, de modo que o campo polarizado seja rapidamente removido. Os prótons retornam ao seu alinhamento original por precessão, em fase ao redor dessa direção (Figura 6C), com um período de 0,5 ms, levando de 1 a 3 s para adquirir sua orientação original. A bobina que envolve o sensor do magnetômetro amplifica o sinal do campo magnético de retorno ao alinhamento original dos prótons, neste momento submetidos ao magnetismo ambiente (KEAREY *et al*, 2002).

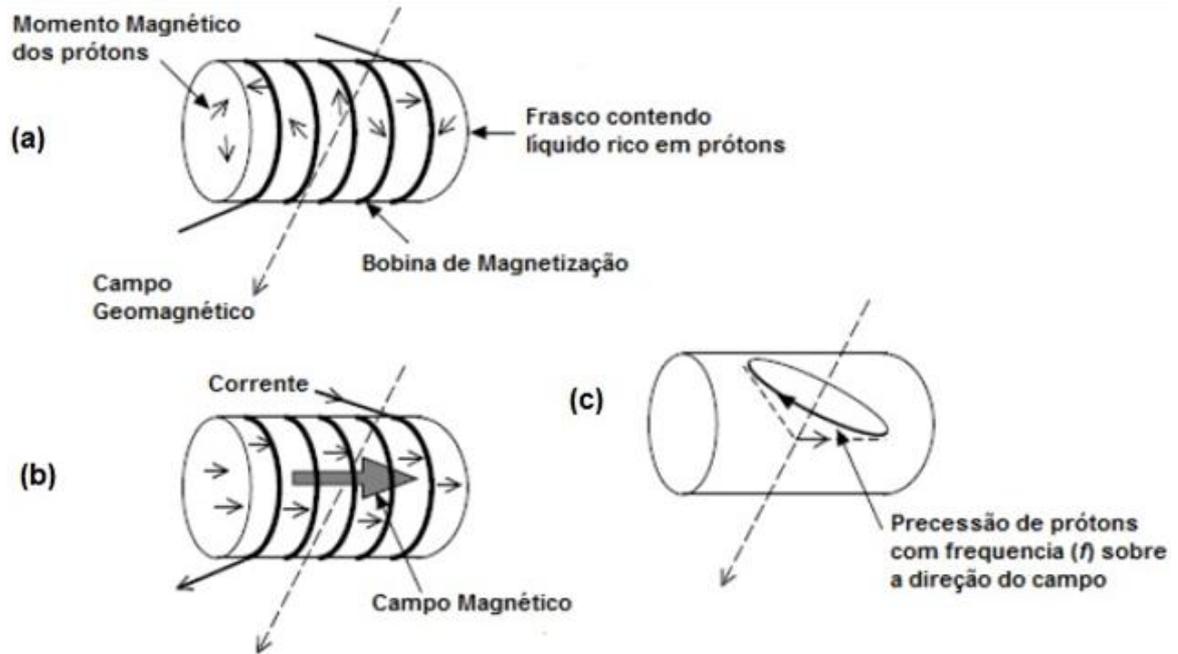


Figura 6 – Princípio do magnetômetro de prótons (LOWRIE, 2007).

O equipamento utilizado é o magnetômetro GEM systems, modelo GSM-8 (Foto 3), com o uso da metodologia de manter uma base (fixa) conhecida, denominada neste estudo de estação base e de uma unidade móvel (*rover*) (Foto 4). Além do posicionamento das coordenadas x e y concomitantemente às leituras da variação da amplitude do campo magnético total, em cada estação. As leituras na estação base de magnetometria foram efetuadas a cada minuto, para uma otimização e fidelidade nas correções.



Foto 3 - Magnetômetro GSM-8 (GEM SYSTEMS, 2008) (Fonte: o autor).



Foto 4 – Aquisições com o magnetômetro móvel (*Rover*) (Fonte: o autor).

As malhas de aquisição de dados pontuais, principalmente em geoquímica e geofísica, podem compreender desde a distribuição aleatória até a malha regular (Figura 7). Estão essencialmente condicionadas, aos objetivos do trabalho e ao acesso à área estudada. Dentre as possibilidades, os arranjos de malha regular são preferíveis diante do efeito estatístico de equivalência do raio de influência entre pontos amostrados, variável no máximo em duas direções.

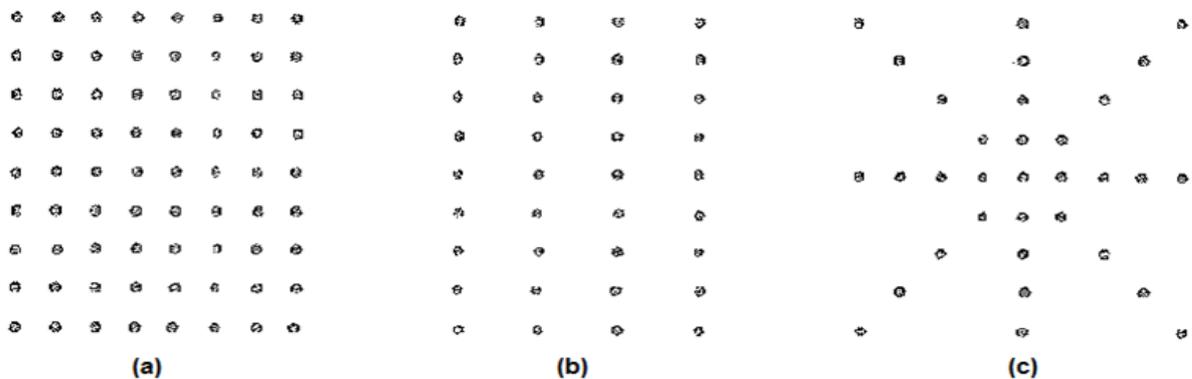


Figura 7 – Principais malhas de amostragem: (a) quadrada. (b) retangular. (c) Radial (MARANHÃO, 1985).

Entretanto, levantamentos terrestres em escala regional são usualmente baseados em malhas irregulares, limitadas a dificuldades de acesso, tais como vegetação densa, drenagens, áreas com topografia acentuada, dentre outras. Neste caso, a questão do raio de influência é amplamente variável. Ambos os casos

representam situações extremas, para as quais existem diversos algoritmos de interpolação para realce ou atenuação (LANDIM, 2003).

Neste trabalho foi adotado o arranjo em malha radial, não convencional em estudos de prospecção magnetométrica e comumente utilizado em prospecção geoquímica em solos (MARANHÃO, 1985). O principal objetivo do emprego deste arranjo é a identificação de direções ou sentidos preferenciais, em grande parte dos casos limitada a condicionantes estruturais como falhas, fraturas ou estruturas de deformação. O centro do arranjo radial foi posicionado aproximadamente na parte central da área de estudos, com leituras em diversos ângulos ou azimutes.

Outro propósito de uso do arranjo radial foi possibilitar o cruzamento do maior número possível de fraturas na direção perpendicular. O uso de arranjos de malha regular apresentam uma cobertura limitada a duas direções, ao passo que a área de estudos apresenta quatro direções de fraturamento.

A análise de imagens de satélite para a área de estudos, em conjunto com detalhamentos estruturais em campo e a revisão do contexto estrutural regional, revelam a existência de quatro famílias principais de fratura, nas direções NE-SW, NW-SE, N-S e E-W. Outro fato relevante neste momento são as informações petrográficas para amostras de rochas da área, cujas descrições da literatura apontam para um gabro com mineralogia típica (Rêgo, 1981).

Neste contexto, ocorrências auríferas serão condicionadas às estruturas posteriormente instaladas, fundamentais tanto para acesso a fluidos hidrotermais quanto para alojamento de filões mineralizados na rocha hospedeira. Portanto, a existência de diversas direções de fratura e a possibilidade de colocação do arranjo no centro do gabro previamente mapeado e reconhecido em campo, justificam a seleção deste arranjo.

Outro aspecto relevante é o desafio proposto neste trabalho, relacionado à busca de mineralizações sulfetadas contidas numa rocha com quantidades consideráveis de magnetita, por meio do método da magnetometria. A eventual detecção de alvos está condicionada à existência de contrastes de propriedades magnéticas e à intensidade destes contrastes.

Neste trabalho, foram realizadas 9 linhas de magnetometria terrestre, com 1.200 m de comprimento cada, num total de 10.800 m (Figura 8).

As linhas foram dispostas em superfície de forma azimutal, com ponto de cruzamento coincidente, aproximadamente, com o centro do gabro, com

espaçamento de 20° entre linhas e leituras da amplitude do campo magnético total a cada 15 m, totalizando 720 estações de leitura. A estação base com coordenadas geográficas centrais de 30°18'38,19" Sul e 53°39'16,86" Oeste.

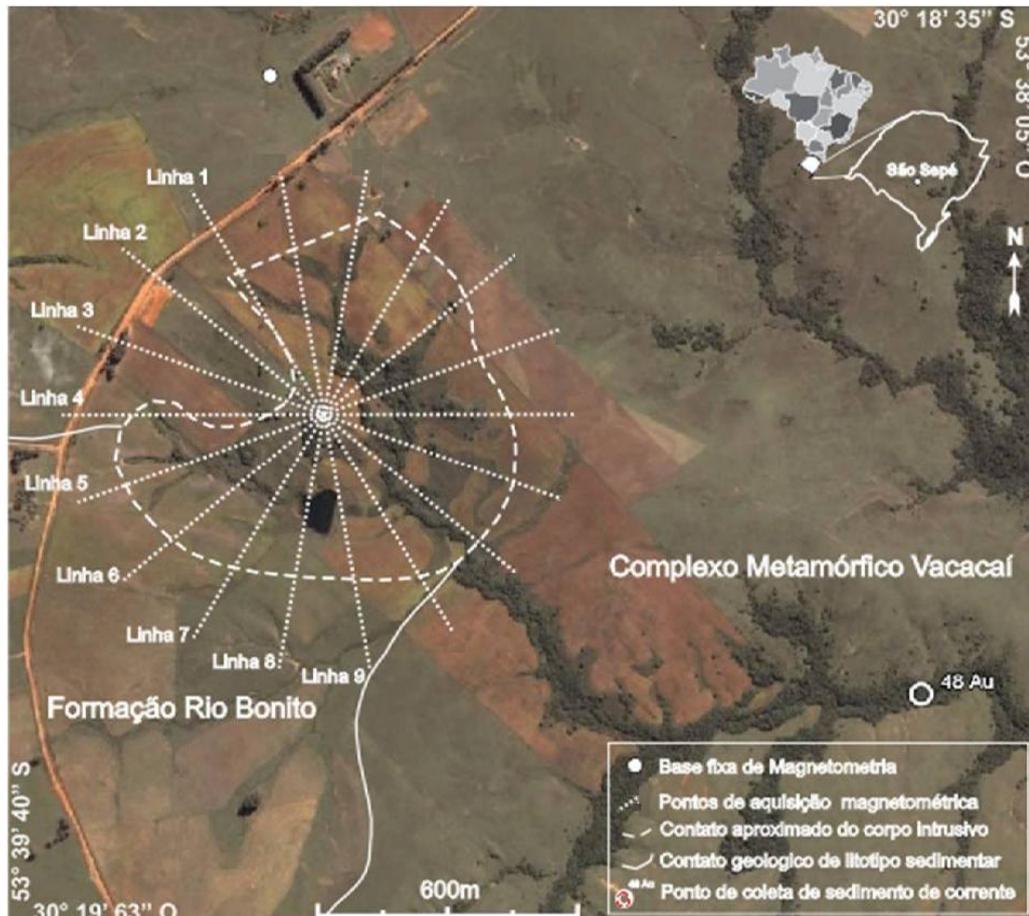


Figura 8 – Malha de aquisição de dados, com localização da estação base magnetométrica, limites do corpo intrusivo baseado em mapeamento geológico e ponto de coleta de sedimento de corrente com número de pintas de ouro (adaptado de GOOGLE EARTH, 2010).

Para a aquisição dos valores de altitudes (z), coordenadas horizontais (x e y) usados na localização das estações magnetométricas, foi utilizado um receptor diferencial GPS Pathfinder Pro - XR da *Trimble Navigation Limited* (Figura 9). Durante o levantamento no campo, é importante ter uma 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 existente até o momento. Estas estações GPS, denominadas de base ou referência 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). Para ter acesso aos dados é necessário um cadastro no site do referido instituto.

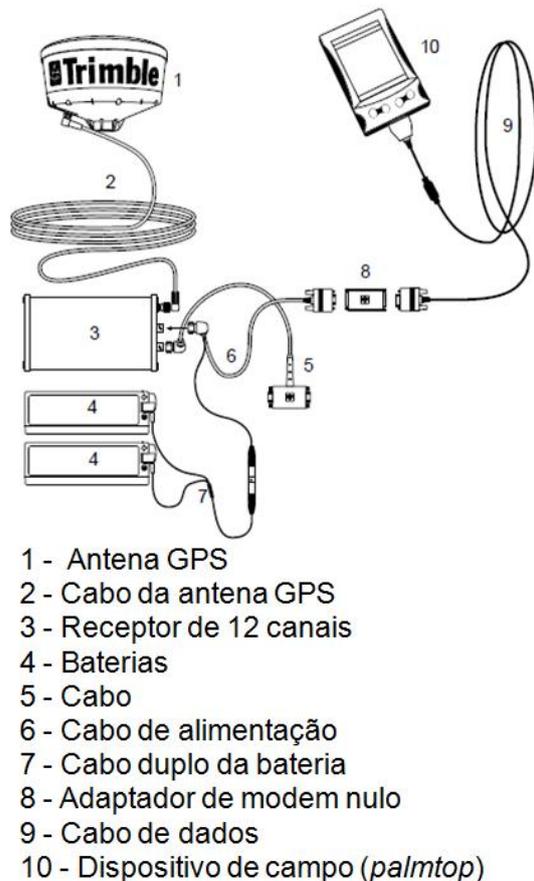


Figura 9 – Sistema de aquisição de dados com o GPS Pathfinder Pro-XR (adaptado de TRIMBLE, 2001).

A tabela 1 descreve as principais características da base de dados de Santa Maria - RS, utilizados na realização da correção dos dados de posicionamento obtidos com o DGPS. As estações de leitura podem ser observadas no mapa de pontos (Figura 10).

Tabela 1 - Estação base utilizada para correções dos dados DGPS (IBGE, 2008).

Identificação da estação GPS	Informação sobre a localização	Informações das coordenadas oficiais
<ul style="list-style-type: none"> Nome da Estação: Santa Maria Identificação da Estação: SMAR Código Internacional: 92013 Esta estação pertence à Rede de Densificação do IGS: <i>International GPS Service</i> (Serviço Internacional de GPS). 	<ul style="list-style-type: none"> A estação consiste em um pilar de concreto dotado e um dispositivo de centragem forçada, localizada na laje do Prédio do Centro de Ciências Rurais - CCR, da Universidade Federal de Santa Maria - RS 	<ul style="list-style-type: none"> Datum utilizado: SAD-69 Latitude: 29° 43' 08,1260" S Longitude: 53° 42' 59,7353" W Alt.Elip.: 113,11 m Alt.Orto.: 104,53 m

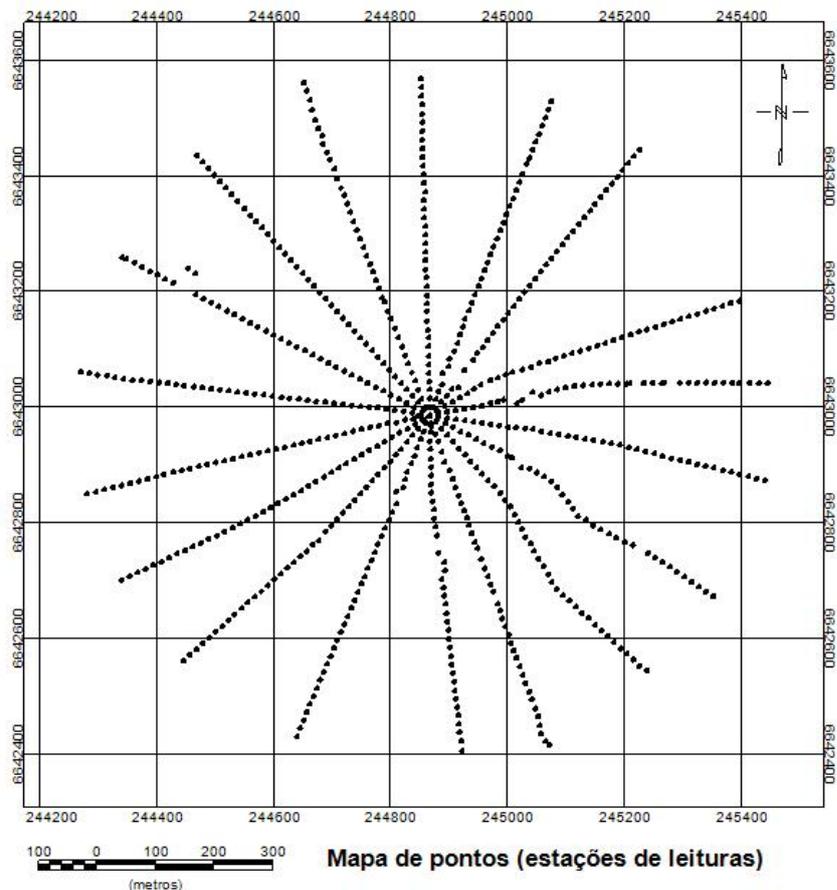


Figura 10 – Mapa de pontos ou estações de leitura magnetométrica.

7.3 Processamento dos Dados

Os dados estruturais foram processados no programa StereoNet 3.03, onde foram gerados diagramas em rosetas. Estes dados são apresentados e discutidos no capítulo 8, deste trabalho.

Os dados magnetométricos foram submetidos à correção diurna, realizada para eliminar as variações provocadas por causas não geológicas, alterações estas

que ocorrem nos valores verificados durante o dia, nos dados do magnetômetro de base em relação ao magnetômetro móvel.

Este procedimento considera o uso de dois magnetômetros (base e móvel), para quantificação do campo magnético em intervalos regulares de tempo. Neste trabalho foram efetuadas leituras a cada minuto no equipamento de base, enquanto o móvel é utilizado para medir o campo conforme a linha planejada.

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 do primeiro em relação ao último. 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 a krigagem.

Uma malha de pontos (*grid*) é gerada na forma de coordenadas x e y com um espaçamento pré-determinado para cada célula, de acordo com a distância das estações adquiridas no campo. Os mapas são gerados para que tendências lineares ou curvilíneas dos dados de interesse possam ser visualizadas.

Esta plataforma possibilita o tratamento de dados sob diferentes possibilidades de filtragens. O subcapítulo 5.8 descreve de forma detalhada os conceitos básicos acerca da Transformada de *Fourier* no domínio das frequências, além dos filtros adotados. 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; malha submetida à Transformada de *Fourier*; aplicação de filtros; geração de mapas magnetométricos.

8 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

8.1 Dados Estruturais

Com os dados estruturais foram elaborados, sob a forma de estereogramas os modelos de pontos e de direção-mergulho. É possível observar a disposição dos pontos ou estações amostradas e as direções preferenciais dos lineamentos estruturais (Figura 11).

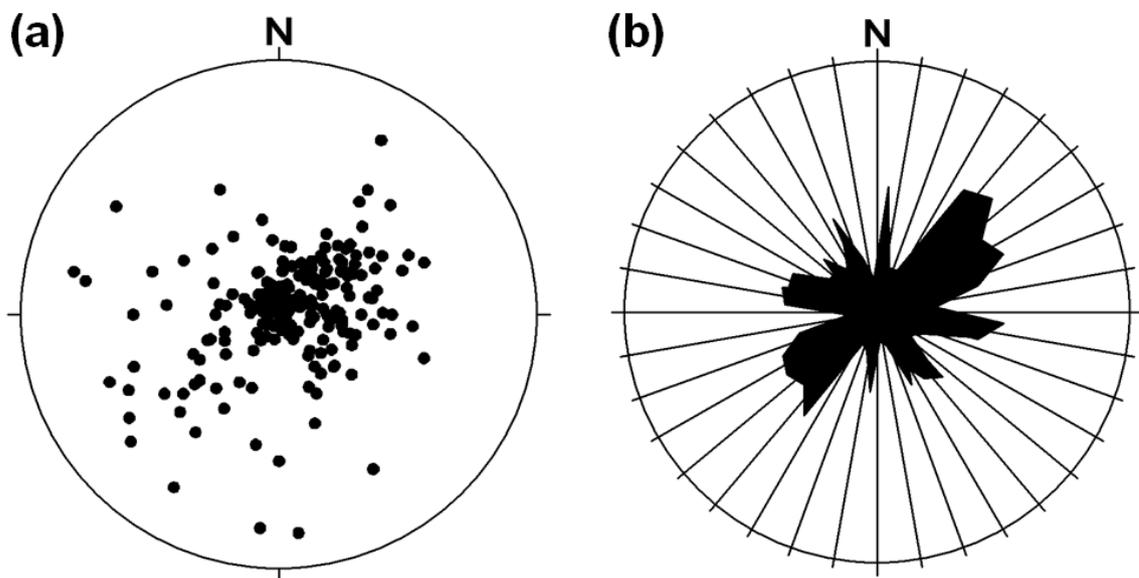


Figura 11 – (a) Diagrama com os 219 pontos de medida estrutural. (b) Diagrama estrutural de roseta com atitudes das fraturas ocorrentes em campo. N= 219.

Por meio da análise do diagrama de roseta é possível notar uma tendência preferencial de direção NE-SW, com famílias subordinadas nas direções aproximadas em E-W e NNW-SSE. Tais famílias também são visíveis num contexto mais amplo, a partir da análise da rede de drenagens fortemente condicionada às estruturas no âmbito do gabro (Figura 12).

A integração dos dados estruturais aos dados geofísicos prévios e adquiridos neste trabalho será fundamental ao atendimento dos objetivos propostos.

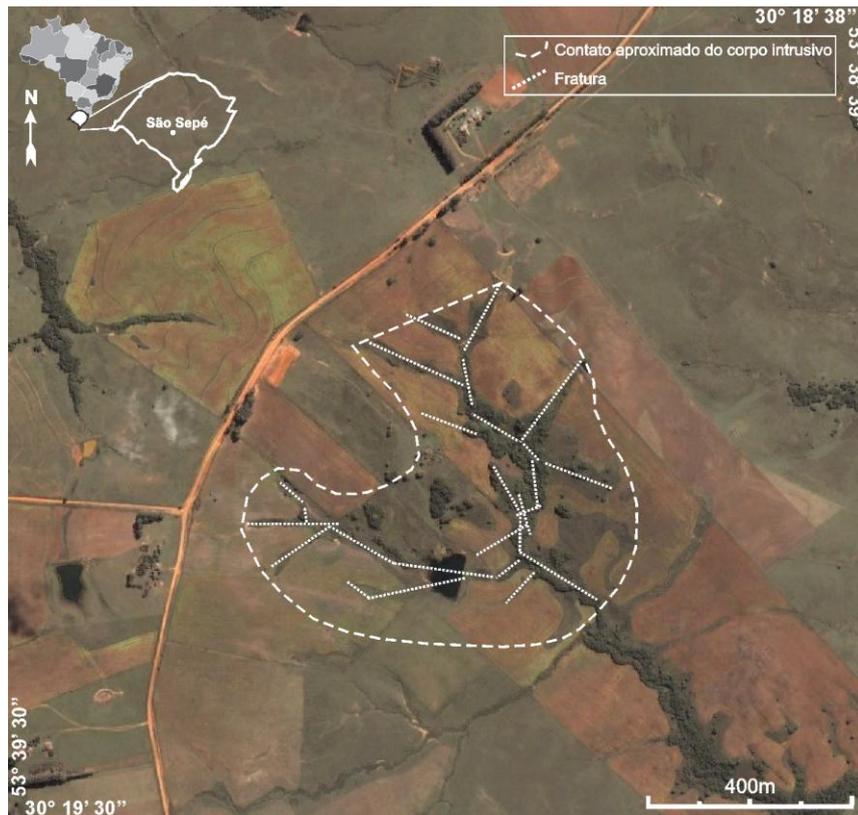


Figura 12 - Limite aproximado do Gabro Santa Catarina, com planos de fraturas (PEREIRA, 2011).

8.2 Dados Magnetométricos

A elaboração dos mapas magnetométricos foi baseada na interpolação por meio do método da krigagem, num *grid* resultante de células de 15 m x 15 m e modelo de variograma exponencial. 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 SAD 69, como uma superfície preferencial na qual são efetuados os cálculos da rede geodésica e são definidas as coordenadas de pontos (IBGE, 2008).

A área de estudos é pouco expressiva em extensão, com pequena variação em termos de latitude. Neste sentido, foi adotado um único valor de Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF) de 22.600,7 nT (NOAA, 2013).

Por meio das leituras da intensidade do campo magnético obtidas nas estações magnetométricas levantadas, foi inicialmente gerado um mapa dos valores de campo magnético anômalo total (Figura 13 A).

Os dados de campo total serviram de base para o processamento e geração de outros mapas, por meio do uso de filtros e algoritmos definidos com base em revisões bibliográficas de livros textos e artigos científicos, para realce de anomalias magnéticas. Na transformação do domínio do espaço para o domínio da frequência através da transformada de *Fourier*, foram gerados os seguintes mapas: regional, residual e sinal analítico e removido o valor do IGRF (Figura 15 A, 16 A, 17 A).

Os mapas magnetométricos de campo anômalo total e regional apresentaram uma continuidade lateral ou prolongamento nas direções E e W. Nestas direções para os referidos mapas ocorre uma tendência a associação entre os altos magnéticos e as linhas de aquisição de dados nos rumos E e W, que pode estar relacionada a aquisição de dados por meio de malha radial.

Neste contexto e em decorrência do adensamento de pontos de aquisição de dados na porção central da área de estudos e a existência de dados geofísicos prévios nesta porção, foi delimitada uma área nos mapas magnetométricos gerados, demarcada por meio de um retângulo. Os dados da área delimitada foram reprocessados, também por krigagem, porém para um *grid* de 20 m x 20 m, com o propósito de enfatizar esta parte da área investigada e facilitar a interpretação dos dados (Figuras 13, 15, 16 e 17).

Com o desígnio de realizar uma análise comparativa entre produtos geofísicos e os condicionantes geológicos verificados e descritos para a área de estudos, foram sobrepostos a área demarcada no centro dos mapas magnetométricos de campo total, regional, residual e sinal analítico o formato aproximado do corpo intrusivo os lineamentos estruturais obtidos por imagens de satélite, descrito em trabalhos anteriores para a mesma área, além do realce para altos magnéticos (Figura 13 B, 15 B, 16 B e 17 B).

O mapa de campo anômalo total apresenta grande variação de valores, com presença de anomalias de continuidade lateral em E-W com altos magnéticos na ordem de 22587 nT, nas porções N, NE, E, S e WSW, dentro dos limites do gabro, com valores intermediários em NW, NNE, SE e SSW (Figura 13 B).

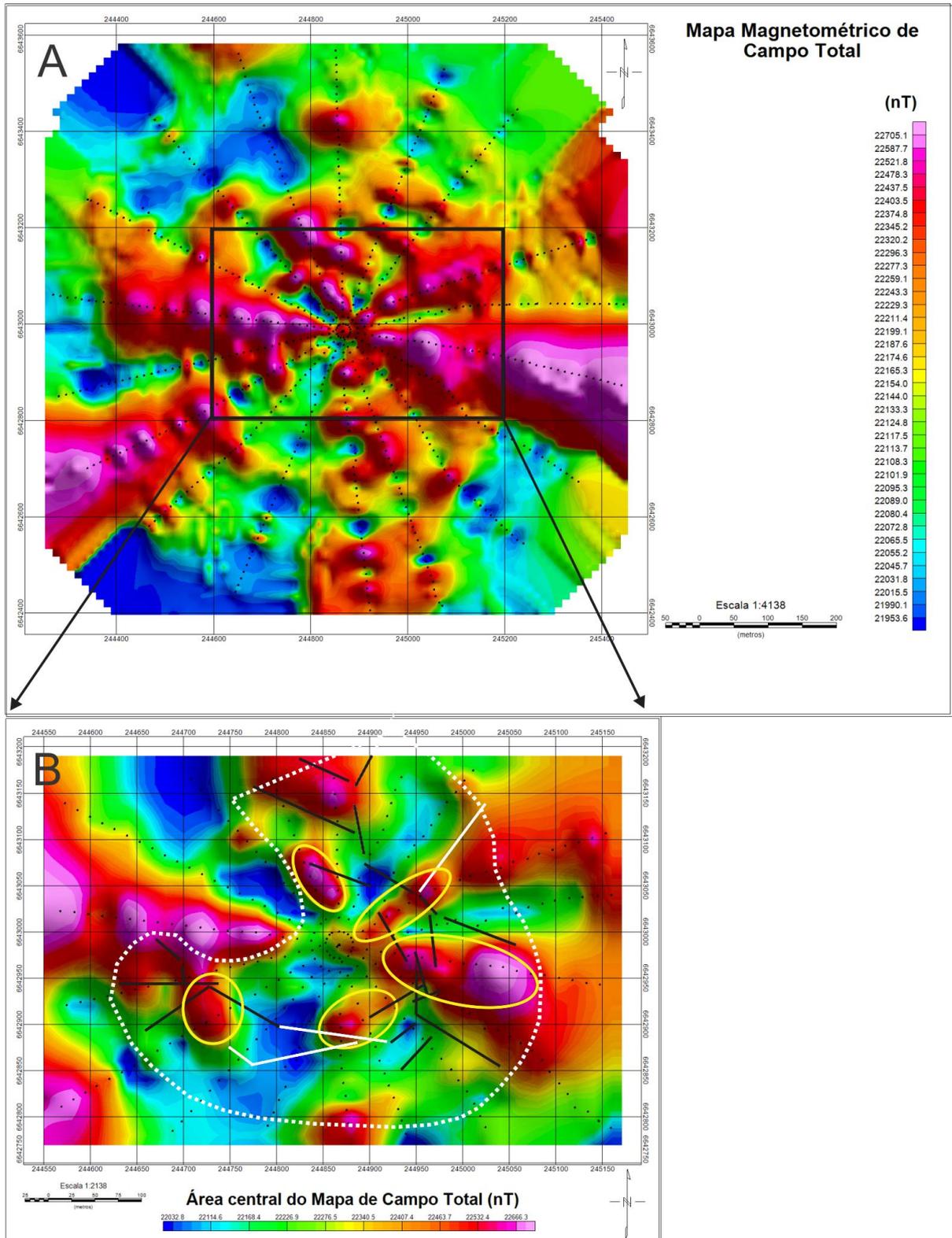


Figura 13 – (A) Mapa de campo magnético total, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa de campo total apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo).

Antes de gerar os mapas magnetométricos regional e residual, foi obtido um espectro de potência radial médio dos dados. A sua análise permitiu a escolha do intervalo do número de ondas adequado para a separação das componentes em rasas e profundas. Para o presente estudo foi obtido comprimento de onda maior e menor que 6 (número de onda por unidade de medida). As fontes profundas apresentam comprimento de onda maior que 0,166 km e profundidades superiores a 45 m. Já as fontes rasas exibem comprimentos de onda menor que 0,166 km e profundidade abaixo de 45 m (Figura 14).

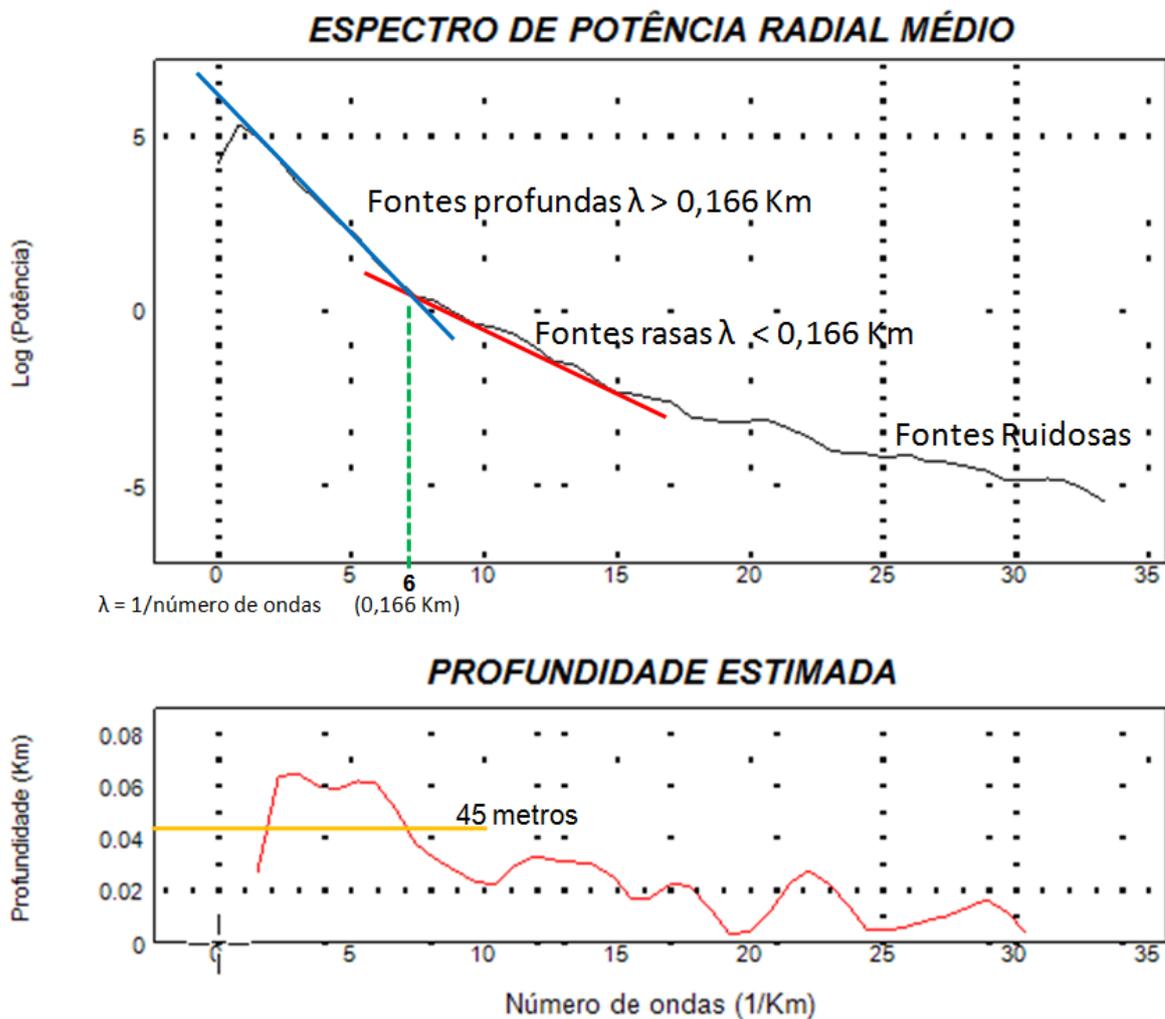


Figura 14 – Espectro de potência radial médio interpretado.

O mapa magnetométrico regional apresenta altos magnéticos nos rumos N, NE, E, S e WSW, na ordem de 168,2 nT, com valores baixos de -612,9 nT em NNE, SE e SW, na área compreendida nos limites do gabro (Figura 15 B).

Este é um filtro do tipo passa baixa, ou seja, seu uso elimina sinais de alta frequência, com o propósito de realçar estruturas ou fontes mais profundas.

O mapa magnetométrico residual apresenta uma distribuição homogênea dos altos valores magnéticos de aproximadamente 38,5 nT (NNW, NE, E, S e WSW) intercalados por valores baixos a intermediários na ordem de -37.8 nT, nos domínios do gabro (Figura 16 B).

Este é um filtro do tipo passa alta, ou seja, seu uso elimina sinais de baixa frequência, com o desígnio de enfatizar estruturas ou fontes rasas.

O mapa para o sinal analítico apresenta áreas com altos magnéticos nas porções WSW, S, SE, E, NE e N, na faixa de 28.0 nT/m com valores baixos de aproximadamente 4.0 nT/m em SW e ENE, nos domínios do corpo intrusivo (Figura 17 B).

O filtro sinal analítico possui como sua principal característica, o posicionamento das amplitudes resultantes imediatamente acima dos limites das estruturas. É possível notar no mapa da amplitude do sinal analítico áreas com altos magnéticos, circundadas por valores baixos, definindo uma zona mais magnética no centro do gabro Santa Catarina.

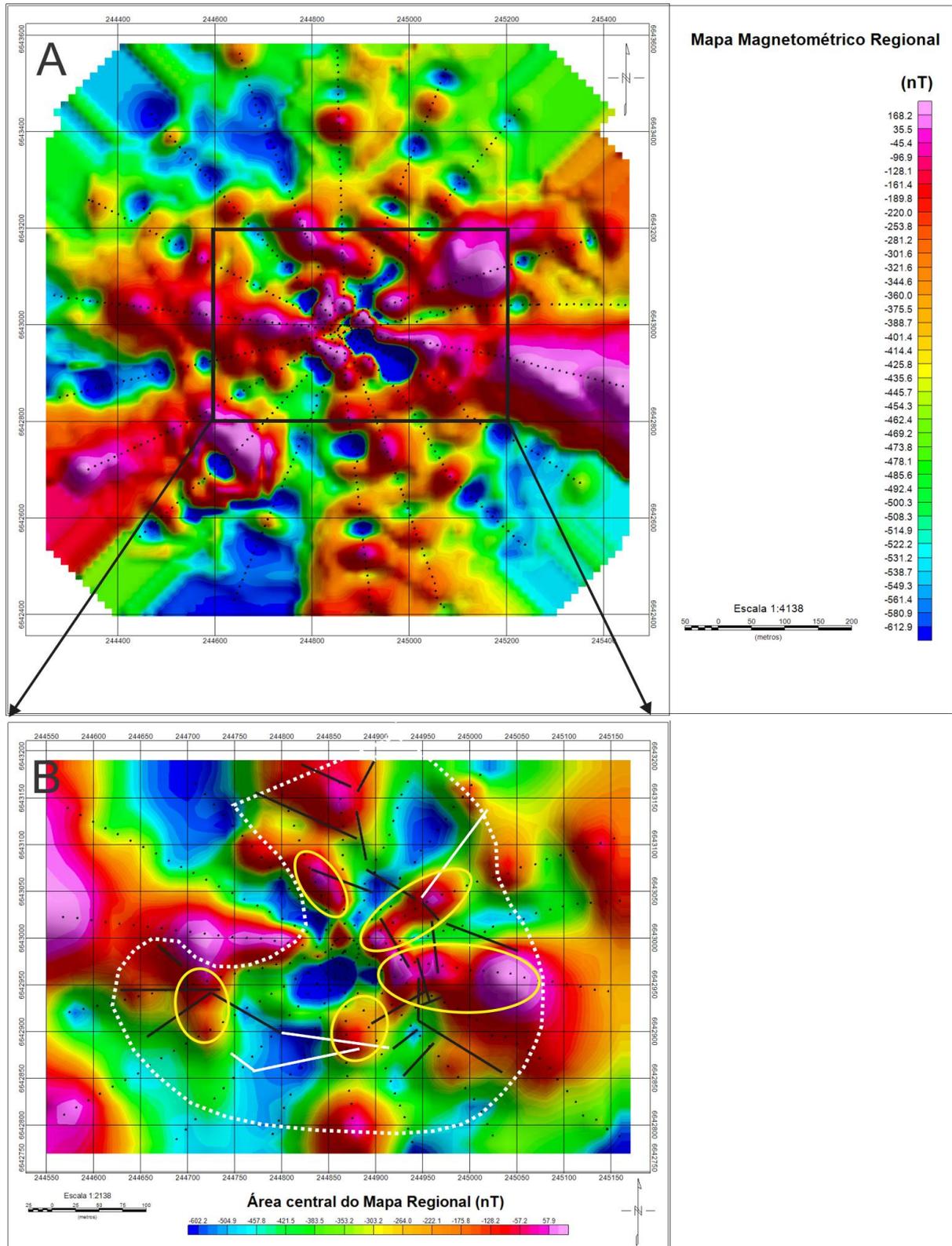


Figura 15 – (A) Mapa magnetométrico regional, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa magnetométrico regional apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo).

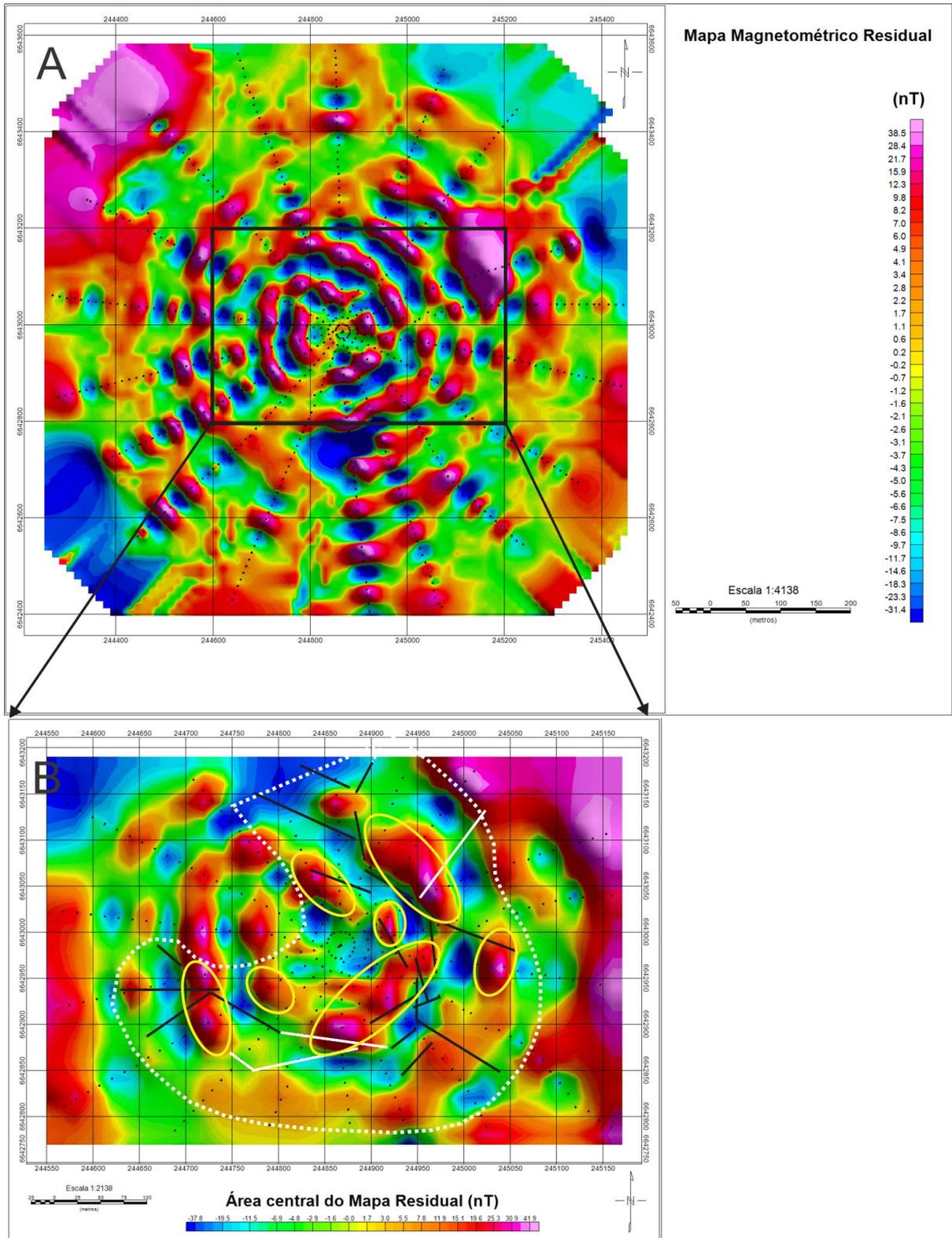


Figura 16 – (A) Mapa magnetométrico residual, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa magnetométrico residual apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo).

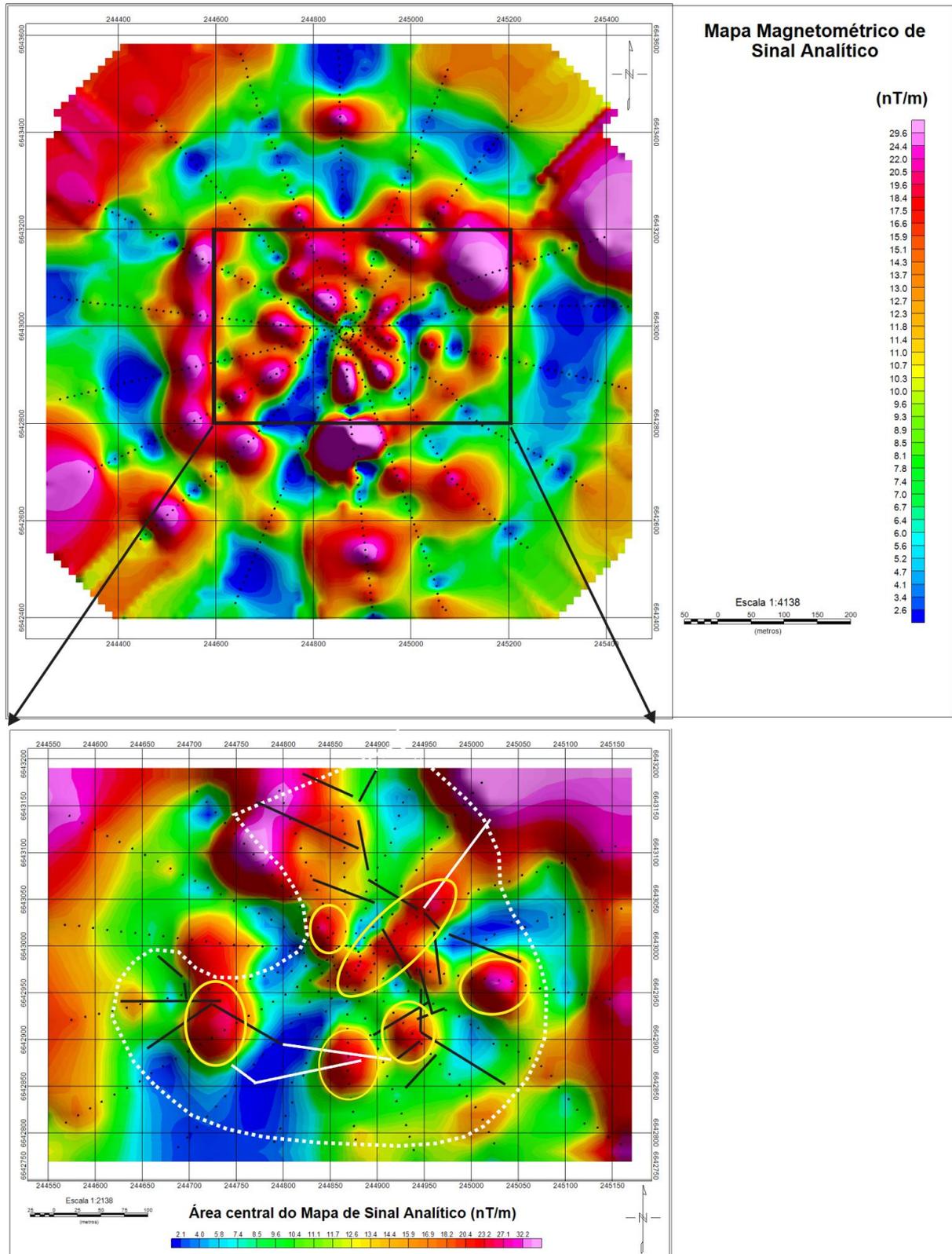


Figura 17 – (A) Mapa de sinal analítico, pontos de aquisição com disposição radial e área demarcada por um retângulo na porção central do mapa; (B) Mapa de sinal analítico apenas da área demarcada com o retângulo, com contato aproximado do gabro (tracejado branco), lineamentos estruturais (linhas contínuas pretas), principais lineamentos (linhas contínuas brancas) e realce para altos magnéticos (circundados em amarelo).

8.3 Dados Geoelétricos Adquiridos em Trabalho Anterior

O estudo de Pereira (2011), desenvolvido em trabalho de graduação pela autora, apresenta resultados da aplicação dos métodos geofísicos da polarização induzida e eletrorresistividade, de forma conjunta com análise estrutural, por imagens de satélite. Foram realizadas três linhas de caminhamento elétrico, dispostas de forma radial, com cruzamento no centro da área e separação de 60° entre linhas e leituras de resistividade elétrica e cargabilidade em arranjo Wenner-Schlumberger (Figura 18).

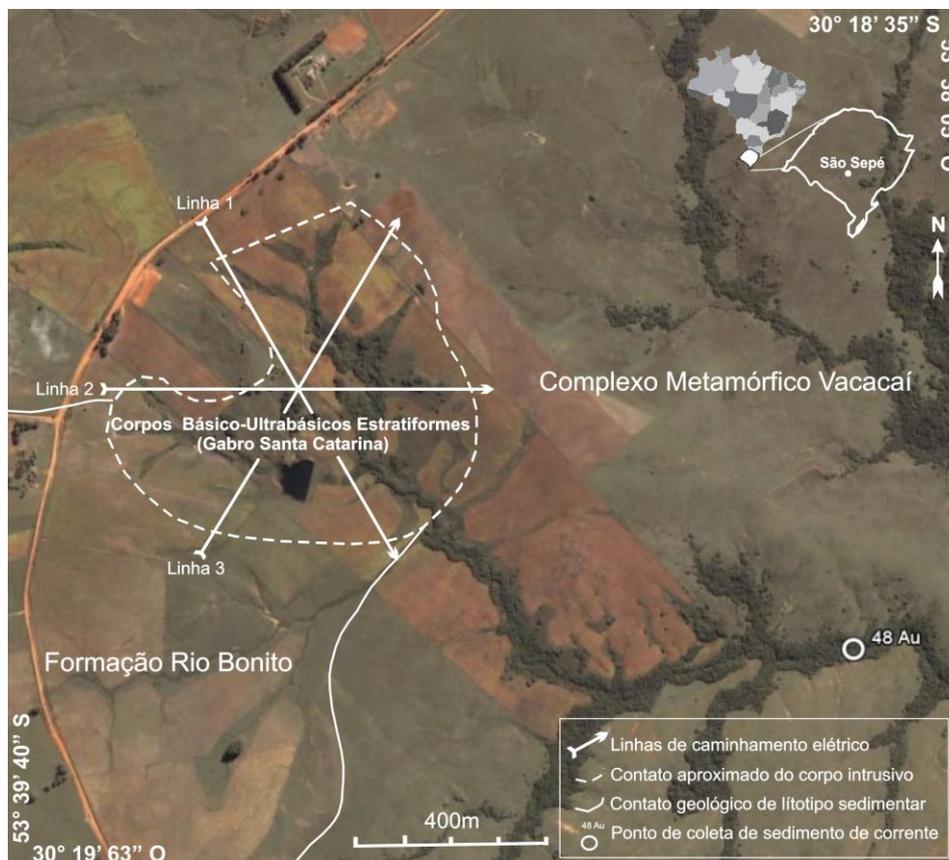


Figura 18 - Limite aproximado do Gabro, com planos de fraturas, linhas de caminhamento elétrico e áreas interpretadas com potencial para mineralização (PEREIRA, 2011).

A associação de áreas de baixa resistividade, e alta cargabilidade obtidos a partir de modelos de inversão bidimensionais permitiu definir zonas potencialmente mineralizadas, relacionadas com estruturas que condicionam a rede de drenagem no domínio do gabro (Figuras 19, 20 e 21). Pintas de ouro detectadas em prospecção geoquímica em sedimento de corrente a jusante do gabro, podem ser originadas da

lixiviação de depósitos contidos em fraturas, por ação de águas fluviais no domínio do gabro, possivelmente caracterizados por sulfetos e ouro associado.

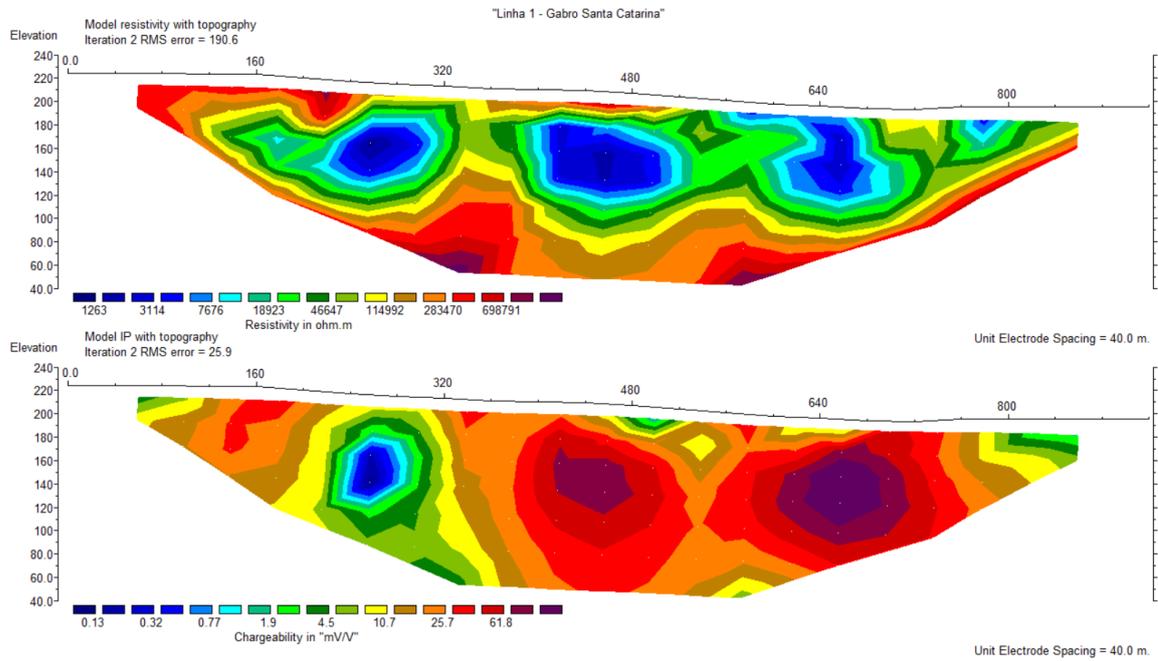


Figura 19 - Modelo de inversão da resistividade - seção superior e cargabilidade – seção inferior, para a linha 1 (PEREIRA, 2011).

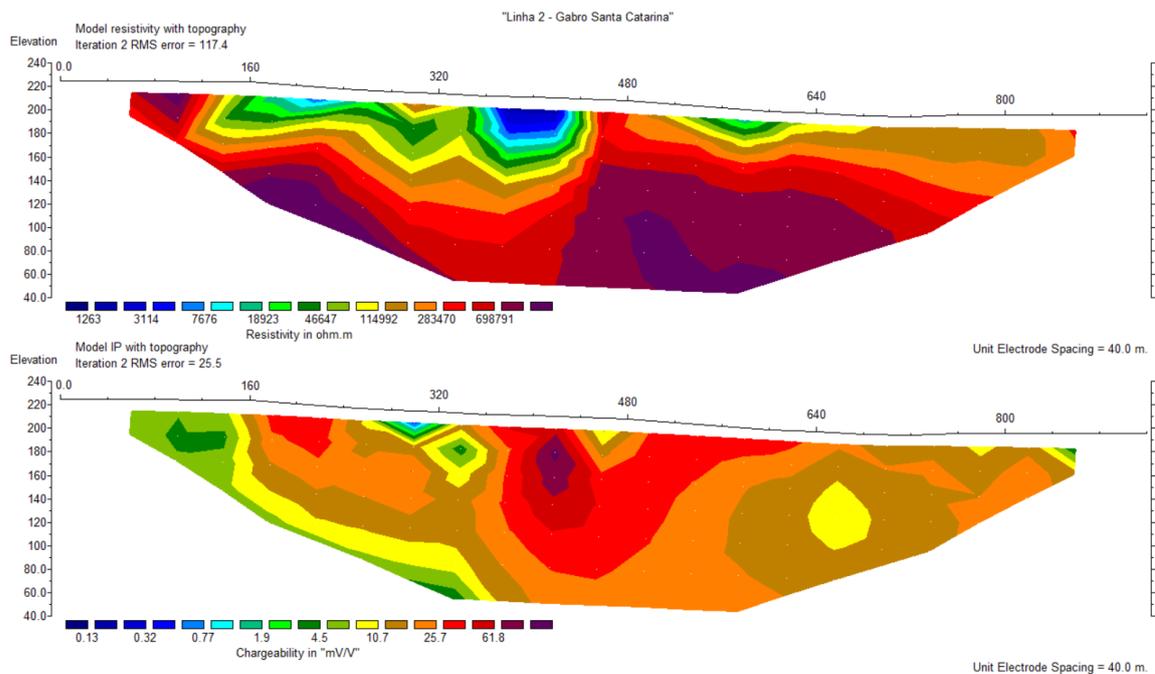


Figura 20 - Modelo de inversão da resistividade - seção superior e cargabilidade seção – inferior, para a linha 2 (PEREIRA, 2011).

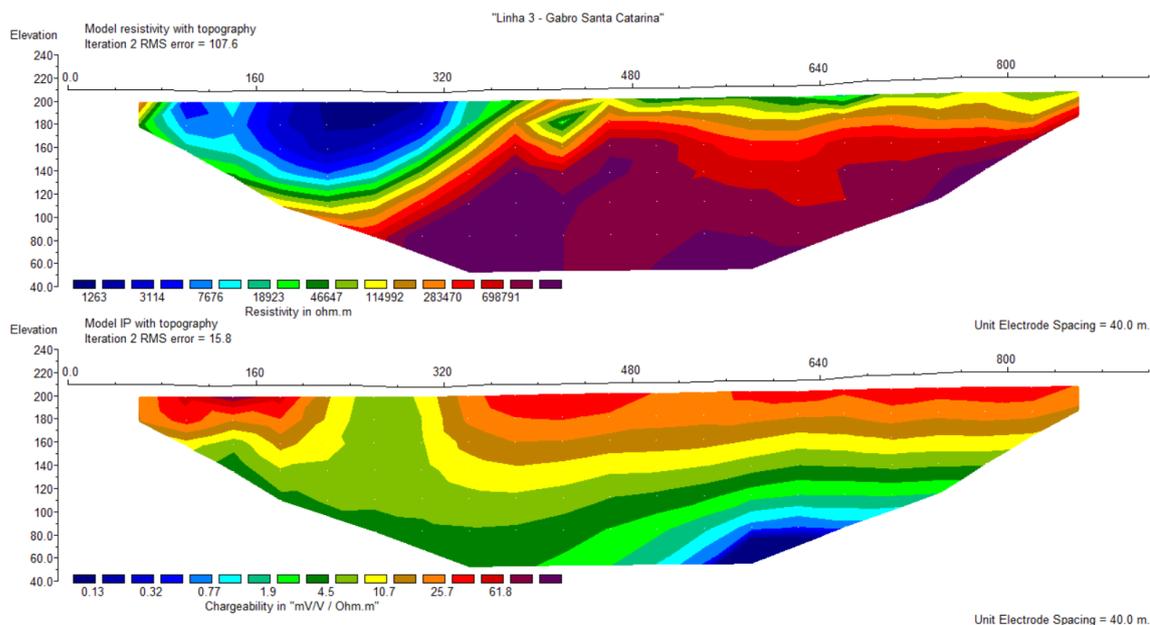


Figura 21 - Modelo de inversão da resistividade - seção superior e cargabilidade – seção inferior, para a linha 3 (PEREIRA, 2011).

8.4 Análise Integrada dos Dados

As áreas com altos magnéticos com realce nos diferentes mapas magnetométricos, foram integradas num mapa único, com sobreposição das diversas seleções, com o objetivo de visualizar as áreas com maior recorrência de altos magnéticos. Este produto de integração permitiu definir as áreas recorrentes com altos magnéticos para quatro áreas limitadas nos quadrantes NE, E, S e SW apontadas com X no mapa (Figura 22).

As áreas nas porções E, S e SW são as mais evidentes em termos de altos magnéticos presentes nos quatro mapas magnetométricos gerados e possivelmente representam ou realçam feições ou estruturas geológicas realmente presentes na área de estudos. Em contrapartida, áreas pouco recorrentes podem indicar artifícios de processamento ou feições desconexas do contexto geológico.

Diante da relevância de condicionantes estruturais ao contexto metalogenético atribuído as prováveis mineralizações em ouro e sulfetos no âmbito do gabro, foi realizado o cruzamento de lineamentos estruturais gerados por integração de dados terrestres e obtidos em imagem de satélite, com alvos recorrentes de elevada amplitude magnética.

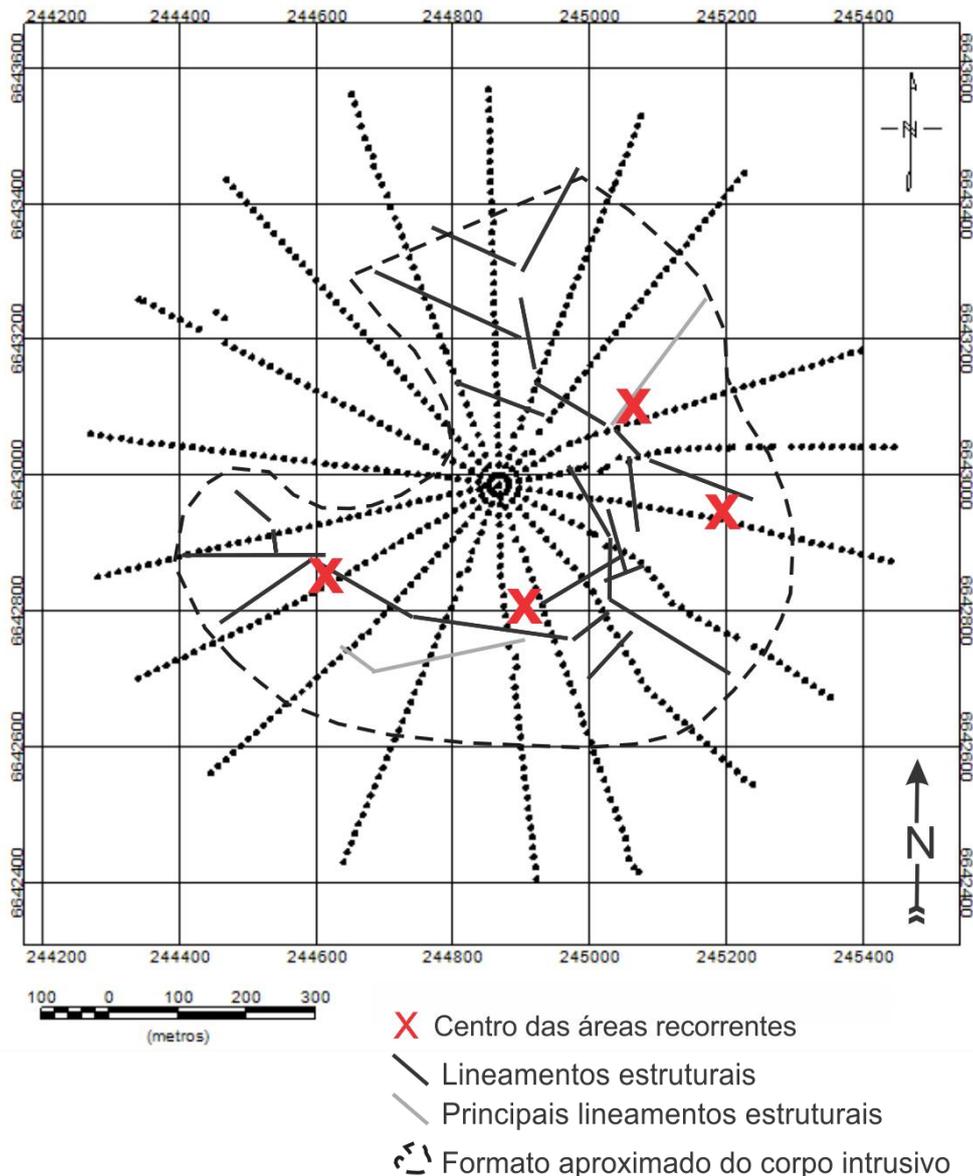


Figura 22 – Integração de áreas com os altos magnéticos e lineamentos estruturais.

É possível notar no mapa magnetométrico residual que as áreas anômalias estão distribuídas de forma homogênea nos domínios do gabro Santa Catarina. Isto é devido à aplicação deste filtro gaussiano, que permite a atenuação das estruturas mais rasas. No entanto, três porções são destacadas por apresentarem uma maior concentração de altos magnéticos em NE, E, S e SW. Estas áreas também são recorrentes no mapa magnetométrico regional que destaca as estruturas mais profundas. No entanto neste mapa as áreas de maior amplitude magnética não apresentam a mesma uniformidade e ganha destaque também a porção N.

O mapa magnetométrico de sinal analítico realça as estruturas imediatamente acima de seus limites e as áreas com altos magnéticos em destaque para este mapa também são nas porções NE, E, S e SW. Correlacionando os resultados obtidos nos mapas magnetométricos foi possível definir as principais áreas referentes às anomalias magnéticas.

As áreas promissoras e recorrentes nos diferentes mapas magnetométricos estão concentradas nas porções NE, E, S e SW. Essas porções estão fortemente relacionadas aos lineamentos estruturais da área de estudo, com destaque para os lineamentos NE e E-W, que por sua vez estão ligadas à quarta fase de deformação, cujos esforços podem ter relação tanto ao fraturamento e abertura de espaços no âmbito do gabro, quanto à remobilização de metais provenientes da encaixante metassedimentar. Tais estruturas estão presentes em duas posições distintas do gabro e limitadas por baixos magnéticos, numa configuração que define ao menos dois dipolos magnéticos com potencial para detalhamento por investigação direta.

Os indícios geoquímicos obtidos em trabalho anterior, em amostras de sedimentos de corrente coletados em drenagens provenientes do gabro revelaram uma quantidade de pintas de ouro bastante superior a média regional. Os lineamentos estruturais mapeados na área controlam a rede de drenagens que nasce nas porções NW do gabro e correm sentido SE. Neste contexto, as zonas com altos magnéticos realçadas são cruzadas por dois canais distintos, unidos posteriormente num único canal que serviu para amostragem geoquímica a 1 km à jusante da área (CPRM, 1995).

Este conjunto de indícios sugere presença de mineralizações filonianas em fraturas, algumas das tais sujeitas à ação intempérica, com liberação e transporte de ouro por ação fluvial e deposição junto a sedimentos de corrente a jusante do gabro.

Embora o gabro seja uma rocha reconhecidamente magnética, os mapas regional, residual e sinal analítico descrevem as áreas com altos magnéticos dentro de seus limites, coincidentes com lineamentos estruturais nas direções NE e E-W. Este fato pode ser atribuído à possível presença de acumulações minerais, em contraste com a ocorrência de cristais de magnetita amplamente dispersos em meio aos silicatos formadores da rocha. Contudo, sob a ausência de minerais magnéticos na encaixante metassedimentar, o gabro é caracterizado por elevada amplitude magnética.

Por meio da integração de produtos geofísicos, geológicos e estruturais, foi elaborado um mapa que integra as áreas de altos magnéticos, lineamentos estruturais, áreas de alta cargabilidade e baixa resistividade (Figura 23).

Esta análise visa avaliar alvos potencialmente relacionados a zonas mineralizadas. Neste sentido, devem ser considerados modelos de gênese de depósitos de ouro e, principalmente a assembléia mineral característica e sua influência na alteração de propriedades físicas em contraste com o gabro.

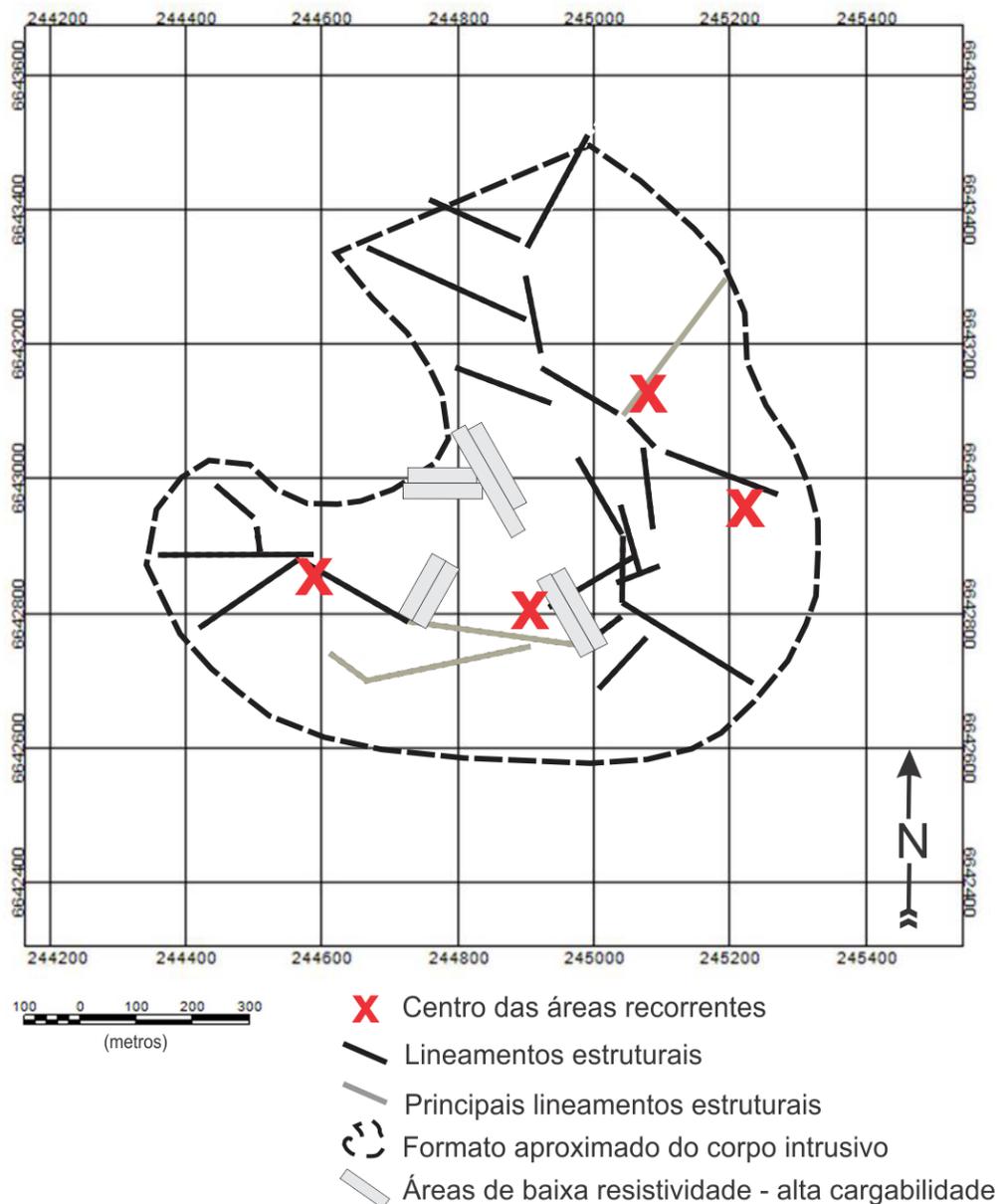


Figura 23 – Cruzamento entre áreas com maior recorrência de altos magnéticos, lineamentos estruturais e áreas de baixa resistividade – alta cargabilidade.

Os resultados magnetométricos obtidos neste estudo, em análise conjunta com dados geoeletricos prévios apresentaram diferentes locações das anomalias detectadas por cada um destes métodos geofísicos, dentro dos limites do gabro Santa Catarina. Apenas na porção sul existe uma correlação entre os dados magnéticos e geoeletricos (Figura 23).

A discordância entre as áreas de baixa resistividade e alta cargabilidade em relação às com altos magnéticos pode estar associada aos processos de alteração de minerais, causados pela reação entre o fluido hidrotermal e a rocha hospedeira. Essa interação altera as propriedades do fluido, especialmente predominantes em termos de acidez (pH) e estado de oxirredução.

A figura 24 descreve o campo de estabilidade para ferro, enxofre e ouro. O pH e o Eh são parâmetros que controlam os campos de equilíbrio dos minerais em sistemas hidrotermais em campos distintos segundo sua estabilidade, como por exemplo a hematita, magnetita, pirita e pirotita, apresentadas no diagrama da figura supracitada.

A deposição de minério na rocha alvo deste estudo ocorreu por preenchimento de fraturas, através da infiltração de líquido hidrotermal proveniente da rocha encaixante que reage com os minerais da rocha, com adsorção de elementos como Fe, Mg e Ca por metassomatismo. A medida em que este processo se desenvolve, o pH do líquido aumenta gradativamente até que próximo ao pH 6, quando ocorre a maior precipitação de sulfetos (Figura 24). A sequência deste processo promove o incremento na assimilação de elementos químicos, até que o pH atinja valores acima de 8, quando passam a ocorrer condições de precipitação de magnetita.

O tempo de ação dos processos metassomáticos é fundamental para aumento do teor de elementos adsorvidos e conseqüentemente do pH do líquido hidrotermal (ROBB, 2005).

Para o caso da área de estudos, é provável que o líquido hidrotermal tenha percolado pelas fraturas até o centro do gabro, posição que resfriou primeiramente e permitiu a precipitação de sulfetos e ouro. A proximidade das áreas adjacentes ao centro do gabro com a encaixante quente devido a ação da 4ª fase de deformação, permitiu que nestas áreas houvesse maior tempo de resfriamento e conseqüentemente o aumento do pH, diante da maior adsorção de elementos, algo que resultou no predomínio de óxidos como a magnetita.

Esta hipótese explica as diferenças de posição das anomalias geoeletricas (baixa resistividade – alta cargabilidade) na parte central do gabro, em relação às anomalias magnéticas, nas porções NE, E e SW na parte periférica do corpo intrusivo, ou seja mais afastado do centro (Figura 24).

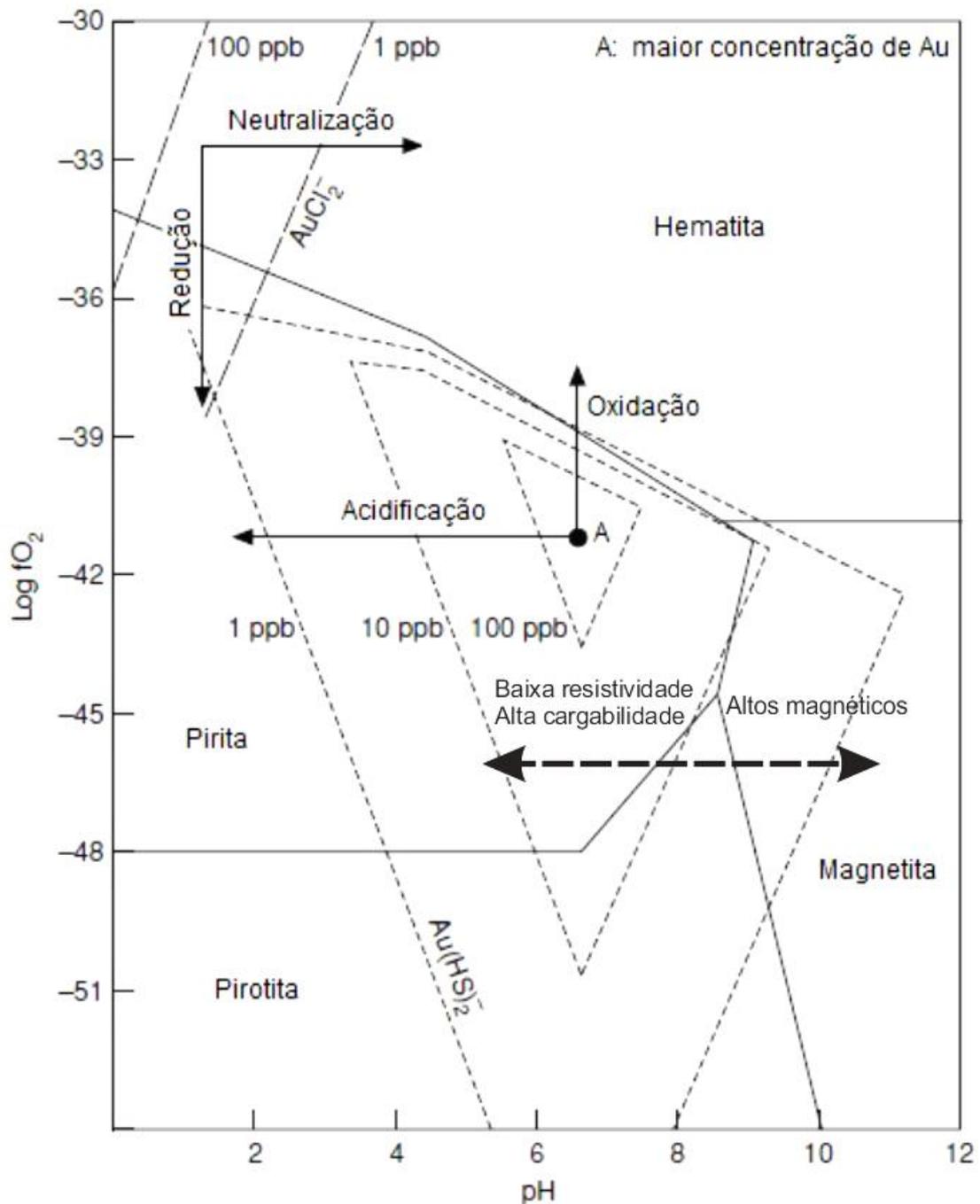


Figura 24 – Diagrama de $\text{Log } f\text{O}_2$ x pH para ouro hidrotermal com campos de domínio mineral e áreas de predominância dos resultados geofísicos (Adaptado de ROBB, 2005).

O contexto tectônico regional é caracterizado por uma evolução policíclica de alta complexidade, onde foram definidas quatro fases de deformação.

A fase de deformação D4 resultou em lineamentos estruturais com direções NE e E-W, cujos esforços podem estar relacionados tanto ao fraturamento, quanto a abertura de espaços no âmbito do gabro. Essa mesma fase contribuiu para a remobilização de metais (sulfetos e ouro) oriundos da encaixante metassedimentar.

Os processos hidrotermais e metassomáticos resultaram em áreas de concentração mineral distintas, com magnetita na porção periférica e sulfetos na zona central no âmbito do gabro.

Os indícios geoquímicos obtidos em trabalho prévio na mesma área, em amostras de sedimentos de corrente coletados em drenagens provenientes do gabro revelaram uma quantidade de pintas de ouro bastante superior a média regional. Os lineamentos estruturais mapeados na área controlam a rede de drenagens no gabro.

Este conjunto de indícios sugere presença de mineralizações filonianas em fraturas, algumas das tais sujeitas à ação intempérica, com liberação e transporte de ouro por ação fluvial e deposição junto a sedimentos de corrente a jusante do gabro. Estes, provavelmente, estão correlacionados às anomalias de baixa resistividade – alta cargabilidade, baseados em condicionantes hidrotermais e metassomáticos.

9 CONCLUSÕES

A prospecção de detalhe por meio da magnetometria terrestre apresentou resultados satisfatórios quanto à busca por contrastes relacionáveis a possíveis acumulações minerais. Os mapas magnetométricos gerados, o campo anômalo total, regional, residual e sinal analítico determinaram parâmetros que definem áreas de maior amplitude magnética.

Os filtros gaussiano regional e residual apresentam como sua principal característica a eliminação ou realce de frequências, com o propósito de atenuar as estruturas mais rasas ou mais profundas. O sinal analítico é caracterizado pelo posicionamento das amplitudes resultantes imediatamente acima dos limites da estrutura. Estes aspectos são bastante evidentes quanto à assinatura magnetométrica do corpo intrusivo, definida por elevada amplitude magnética próximas ao contato geológico.

Neste sentido, o processamento por meio dos filtros escolhidos demonstrou eficácia como ferramenta auxiliar na delimitação de intrusivas máficas em contextos metassedimentares.

O mapa magnetométrico de sinal analítico é o que permite definir com mais clareza a localização de limites geológicos. Este mapa apresentou altos magnéticos em NE, E, S e SW, coincidentes com os apresentados nos demais mapas. Estas áreas estão circundadas por baixos valores magnéticos. Deste modo, é possível definir o contato aproximado entre o corpo intrusivo em relação a sua encaixante. O mesmo ocorre para o mapa magnetométrico residual de realce para a porção central da área de estudos, onde é possível observar anomalias magnéticas cercadas por baixos magnéticos.

A análise integrada de dados estruturais e geofísicos demonstrou eficácia na tentativa de correlações entre anomalias geofísicas e famílias de fraturas, num contexto de depósito filoniano de ouro e sulfetos.

O arranjo radial empregado na aquisição dos dados apresenta limitações, em decorrência da distância entre os pontos de coleta de dados, à medida que ocorre o afastamento do centro do arranjo. Considerando estas restrições foram adotados os procedimentos mais adequados ao tratamento dos dados magnetométricos, além de uma análise concentrada na porção central da área de estudo. Contudo o arranjo radial empregado possibilitou o cruzamento do maior número de fraturas na direção

perpendicular. Arranjos de malha regular apresentam uma cobertura limitada a duas direções, ao passo que a área de estudos apresenta quatro direções de fraturamento, desta forma foi possível atender ao propósito de uma cobertura adequada para prospecção mineral de detalhe.

Devido aos processos metalogenéticos que devem ter controlado a gênese do minério, as anomalias magnéticas são indiretamente relacionadas as mineralizações auríferas. Apenas na porção S da área ocorre uma proximidade entre os altos magnéticos e as anomalias geoeletricas. Contudo, diante da eficácia no diagnóstico de alvos magnéticos numa rocha rica em minerais magnéticos como um gabro, os resultados demonstram a aplicabilidade da magnetometria no detalhamento de mineralizações em corpos máficos e ultramáficos, como mineralizações primárias em cobre, níquel e cromo.

Estudos geofísicos utilizando o método da magnetometria como os de Sharma (1986), Sultan *et al* (2009), Machado & Penha (1997), Oliveira (2007) e Suárez *et al* (2012), obtiveram êxito na busca por um detalhamento de corpos mineralizados e na tentativa de delimitação de intrusivas. Neste sentido, resultados geofísicos obtidos neste trabalho são condizentes aos apresentados pelos referidos autores.

REFERÊNCIAS

- BORBA, A. W. **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil):** uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica. 2006. 121 f. Tese – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil). **Folha Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul.** Brasília, 1 mapa. Escala 1:250.000. 2000.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil). **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil:** folha Passo do Salsinho. Brasília, 1995.
- GEM SYSTEMS. **GSM-8 instruction manual.** Markham, 2008. Manual release 7.2. Disponível em: <<http://www.allied-associates.co.uk/pdfmanuals/GSM-8%20Manual%20February%2021%202008.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2013.
- GEOSOFT. **Montaj MAGMAP filtering:** 2-D frequency domain of potential field data extension for Oasis Montaj. Version 6.1. Toronto, 2005. Programa de computador.
- GOOGLE. Google Earth. Versão 4.3 (beta). 2010. Programa de computador. Europa Technologies – US Dept. of State Geographer.
- 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. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/bdgpesq_googlemaps.php>. Acesso em: 28 jul. 2013.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration.** 3rd. ed. United Kingdom: Blackwell Publishing Company, 2002.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos.** 2. ed. São Paulo. Editora Unesp, 2003.
- LOWRIE, W. **Fundamentals of geophysics.** 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.
- LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. **Geofísica de prospecção.** Belém: Universidade Federal do Pará, 1995.
- MACHADO, S. A. M.; PENHA, U. C. Estruturação da seqüência vulcano-sedimentar Rio Mata Cavallo (Morro do Pilar, MG, Brasil) baseada na análise qualitativa de dados geofísicos. **Revista Brasileira de Geofísica,** São Paulo, v. 15, n. 2, 1997.

MARANHÃO, R. J. L. **Introdução a Pesquisa Mineral**. 2 ed. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, p.796. 1985.

MOON, C. J.; WHATELEY, M. E. G.; EVANS, A. M. **Introduction to mineral exploration**. 2nd. ed. Austrália: [s.n.], 2006.

NABIGHIAN, M. N.; GRAUCH, V. J. S.; HANSEN, R. O.; LAFEHR, T. R.; LI, Y.; PEIRCE, J. W.; PHILLIPS, J. D.; RUDER, M. E. 75th anniversary: the historical development of the magnetic method in exploration. **Geophysics**, Tulsa, v. 70, n. 6, p. 33nd-61nd, nov./dez. 2005. Disponível em: <<http://geophysics.geoscienceworld.org/content/70/6/33ND.full>>. Acesso em: 15 jul. 2013.

NOAA. **Estimated values of magnetic field**. 2013. Disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>>. Acesso em: 28 ago. 2013.

OLIVEIRA, J. F. de. Respostas da magnetometria e gamaespectrometria direcionadas à prospecção de cromita no mapeamento geológico da Folha Mombaça, Estado do Ceará, Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 10., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGF, 2007. [p. 1-6]. Disponível em: <<http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=42445>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

OLIVEIRA, R. G. **Dados geofísicos**: arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da província Borborema e de sua margem continental Nordeste do Brasil. 2008. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: <ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/RobertoGO_pag83_ate_pag112.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2013.

PAIM, S. G.; LOPES, R. C. **Geologia da região das Minas do Camaquã**: Minas do Camaquã. Ronchi & Lobato, p. 366. Unisinos, São Leopoldo - RS, 2000.

PEREIRA, A. M. **Caracterização geofísica no gabro Santa Catarina, São Sepé (RS)**. 2011. 55 f. Monografia – curso de geofísica - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2011.

RÊGO, I. T. S. F. Aspectos petrológicos e geoquímicos do Complexo Básico-Ultrabásico de Pedras Preta. **Acta Geológica Leopoldênsia**, Rio Grande do Sul. v. 5, n. 10, p. 197-278, 1981.

ROBB, L. **Introduction to ore-forming processes**. Carlton South: Blackwell Publishing, p. 6-386, 2005.

RODRIGUES, C. R. O.; BENNEDETTI, O. J.; STROHSCHOEN J. R. O. **Geologia da faixa II da Folha Passo do Salsinho, RS, Porto Alegre**. Porto Alegre: UFRGS, 1982.

SHARMA, P. V. Magnetic method applied to mineral exploration. **Ore Geology Reviews**, Amsterdam, v. 2, n. 4, p. 323-357, aug.1986. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169136887900102>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

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, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.org.ar/pdf/scg/v28n2/v28n2a10.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2013.

SULTAN, S. A.; MANSOUR, S. A.; SANTOS, F. M.; HELALY, A. S. Geophysical exploration for gold and associated minerals, case study: Wadi El Beida area, South Eastern Desert, Egypt. **Journal of Geophysics and Engineering**, [S.l.], v. 6, n. 4, p. 345- 356, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/6/4/002>>. Acesso em: 18 set. 2013.

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

TRIMBLE. **GPS Pathfinder Systems**: receiver manual. Sunnyvale, 2001. Version 1.00. Revision B. Disponível em: <<http://www.landlinur.is/attach/Pathfinder%20mælitæki.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2013.