



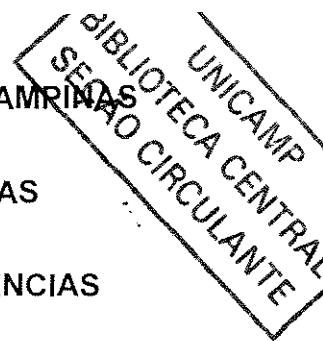
UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE



200207447

SILVIA BEATRIZ ALVES ROLIM

**RESPOSTA GEOFÍSICA DOS DEPÓSITOS DE OURO DA PORÇÃO
CENTRAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como
parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor
em Ciências na área de Metalogênese.

Orientador: Professor Doutor Gilberto Amaral (*in memoriam*)

Co-Orientador: Professor Doutor Carlos Alberto Mendonça

Este exemplar corresponde à
redação final da tese defendida
por Silvia B. Alves Rolim
e aprovada pelo Conselho Julgador
em 28/10/2001
Carlos Mendonça
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

JULHO - 2001

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE BC
Nº CHAMADA T/ UNICAMP
R646r
V SV
TOM 47854
PREC 46.837/02
C 0 X
PREÇO R\$ 11,00
DATA 15-02-02
Nº CPD _____

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IG - UNICAMP - IG

CH00163689-6

R646r Rolim, Silvia Beatriz Alves
Resposta geofísica dos depósitos de ouro da porção central do
Quadrilátero Ferrífero, MG. / Silvia Beatriz Alves Rolim.-
Campinas,SP.: [s.n.], 2001.

Orientadores: Gilberto Amaral, Carlos Alberto Mendonça
Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Geociências.

1. Geofísica. 2. Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais.
3. *Geofísica Aplicada. 4.*Metalogênese. 5.*Modelagem Geofísica
I. Amaral, Gilberto. II. Mendonça, Carlos Alberto.
III.Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências
IV.Título.



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE**

AUTORA: SILVIA BEATRIZ ALVES ROLIM

**TÍTULO DA TESE: RESPOSTA GEOFÍSICA DOS DEPÓSITOS DE OURO DA PORÇÃO
CENTRAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**

ORIENTADOR: Professor Doutor Gilberto Amaral (*in memorian*)

CO-ORIENTADOR: Professor Doutor Carlos Alberto Mendonça

Aprovada em: ____/____/____

PRESIDENTE: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça Carlos Mendonça **IAG-USP**

Prof. Dr. Alfonso Schrank Alfonso Schrank **IG-UNICAMP**

Prof. Dr. Álvaro Penteado Crosta Álvaro Penteado Crosta **IG-UNICAMP**

Prof. Dr. Augustinho Rigoti Augustinho Rigoti **DEGEO UFPR**

Prof. Dr. Issamu Endo Issamu Endo **DEGEO-UFOP**

Campinas, de de 2001

*Para Lília Rodrigues Alves (Dinda),
por tudo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e instituições que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, e em especial:

- ao Professor Doutor Carlos Alberto Mendonça, pela valiosa e indispensável orientação, incentivo, contribuições, discussões científicas, ética, seriedade profissional, amizade e respeito durante este trabalho.
- à Professora Doutora Jacinta Enzweiler, pelo apoio constante, amizade, seriedade, honestidade, caráter, competência no que realiza e, principalmente, pelo respeito ao ser humano.
- à fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida durante o período de realização deste trabalho.
- à Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM), pelo fornecimento dos dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas e do Convênio Geofísica Brasil-Alemanha. Em especial, agradeço aos geólogos Mário Metello, Maria Laura Vereza de Azevedo, Marcelo Vieira, Orivaldo Ferreira Baltazar, Claiton Piva Pinto e Márcia Zuchetti, que sempre se mostraram disponíveis para me receber e discutir questões a respeito da geofísica da área.
- à TELEMAR, representada pelo Doutor Vitório Tiengo Filho, pelo fornecimento da base de dados geomorfométricos digitais.
- ao Geólogo Jaime Duchini Junior (Mineração Morro Velho), pelo acompanhamento nos trabalhos de campo, fornecimento de dados de furos de sondagens, discussões científicas e, principalmente, pela constante disposição em me auxiliar.
- à Telma Aisengart Santos e Ana Cristina Chaves Sartori da empresa Geosoft Latinoamérica, pela amizade e apoio técnico no programa Oásis MontajTM.
- ao Professor Doutor Augustinho Rigoti, pela valiosa contribuição durante a participação na banca do exame de qualificação da tese.
- ao Professor Doutor Alfonso Schrank, pela participação na banca do exame de qualificação e sugestões que contribuíram para este trabalho.
- ao Prof. Dr. Álvaro Crosta, pela contribuição durante sua participação na banca do exame de qualificação e, em especial, por sempre se mostrar disponível para responder minhas perguntas, referentes à tese ou não, por mais atarefado que estivesse.
- ao Renato Viera Passos pelo amor compartilhado durante estes anos e, principalmente, pela infinita paciência em aturar uma doutoranda.

- aos amigos Ana Luisa e Ilton Roberto Oliveira, Luis Alberto Dávila Fernandes, Regla, Marcelo Guitarrari, Marcelo e Nilma Bendelak, Eduardo Gayoso, Marywell, José Adilson e Marilda, Venerando Amaro, Marcelo Bassetto, Carlos Tapia, Rosana Okida, Ricardo Brasil, Felipe Deepe, Juliano Kühle, Leonardo Fonseca, Lucimar, Marli Andrade, Catarina Toledo, Mauricio Prado, Sérgio Machado, Carlos Roberto de Souza Filho, pelo incentivo.

- aos meus alunos das disciplinas de graduação de Aerofotogeografia dos anos de 2000 e 2001 e de Processamento de Imagens do ano de 2001 (Turma da Engenharia Cartográfica), pelo excelente convívio e constante apoio durante a última fase da tese.

- aos colegas do Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências, UFRGS, pela permissão para meu afastamento durante três anos e meio, bem como pelos constantes apoio e incentivo. Em especial, agradeço ao amigo Professor Clóvis Carraro, pelo respeito e confiança depositados durante esse período de crescimento profissional e pessoal, e que sempre nortearam nossa amizade, desde o tempo da graduação.

- à Darci Viera Passos, pela sua preocupação, rezas, amor e carinho dispensados a mim durante esses anos.

- a um grupo especial de amigos que trago no meu coração e que esteve presente durante todas as fases deste doutorado. Agradeço a sorte de ter conhecido vocês: Ana Luiza Miranda, Éder Moreira, Jane Nobre Lopes, Helder Lages Jardim, Marcelo Matsdorf, Miró, Nelma Rocha, Rosemary Hoff e a Silvânia Maria Netto.

- à minha família que, mesmo sem entender o que se passa na cabeça de uma doutoranda, me incentivou constantemente e foi meu porto seguro. Agradeço à Gabriela, Gustavo, Zé, Nair, Kátia, Dinda, Glória, Mindo, Lula, Ana e Fernando. Em especial, agradeço à minha irmã Rosaura, pelo seu amor.

- à Fundação SROLIM, pelo financiamento deste doutorado.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 – RELEVÂNCIA DO TEMA	1
1.2 – OBJETIVOS	3
1.3 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	4
1.4 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	4

CAPÍTULO 2: ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 – INTRODUÇÃO	9
2.2 – CONTEXTO GEOLÓGICO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	9
2.3 – SÍNTESE DOS MODELOS PROPOSTOS DE EVOLUÇÃO TECTÔNICA PARA O QUADRILÁTERO FERRÍFERO	20
2.4 – ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO	26
2.4.1 – TERRENOS GRANITO-GNÁSSICOS	26
2.4.2 – SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	30
2.4.3 – SUPERGRUPO MINAS	36
2.5 – PRINCIPAIS FEIÇÕES TECTÔNICAS DA ÁREA DE ESTUDO	36
2.6 – CARACTERÍSTICAS DAS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS DA PORÇÃO CENTRAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	39

CAPÍTULO 3: GEOFÍSICA APLICADA À EXPLORAÇÃO DE OURO EM TERRENOS DO TIPO GREENSTONE-BELT: CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS E NÍVEL ATUAL DO CONHECIMENTO

3.1 – INTRODUÇÃO	47
3.2 – RESPOSTAS GEOFÍSICAS DE MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS EM TERRENOS ARQUEANOS	47
3.3 – LEVANTAMENTOS MAGNETOMÉTRICOS	50
3.3.1 – RESPOSTAS DO CAMPO MAGNÉTICO COM BASE EM MODELOS GEOMÉTRICOS	52
3.4 – LEVANTAMENTOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	61
3.5 – LEVANTAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS	64
3.5.1 – MÉTODO ELETROMAGNÉTICO EM FREQUÊNCIAS BAIXAS A MÉDIAS (EM)	65
3.5.2 – MÉTODO VERY LOW FREQUENCY (VLF)	76
3.6 – ESTUDOS GEOFÍSICOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	76

CAPÍTULO 4: CARACTERÍSTICAS DA BASE DE DADOS DA ÁREA INVESTIGADA

4.1 – INTRODUÇÃO.....	79
4.2 – PROJETO RIO DAS VELHAS.....	79
4.2.1 – DADOS AEROGEOFÍSICOS.....	79
4.2.2 – DADOS GEOLÓGICOS.....	87
4.3 – CONVÊNIO GEOFÍSICA BRASIL ALEMANHA (CGBA).....	88
4.4 – BASE DE DADOS GEOMORFOMÉTRICOS	91
4.5 – DADOS GEOLÓGICOS	92

CAPÍTULO 5: TRATAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

5.1 – INTRODUÇÃO.....	93
5.2 – PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	94
5.3 – PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	94
5.3.1 – GERAÇÃO DOS ARQUIVOS TEMÁTICOS	94
5.3.2 – REMOÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO REGIONAL DA TERRA	94
5.3.3 – CONVERSÃO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	95
5.3.4 – GERAÇÃO DAS MALHAS REGULARES.....	96
5.3.5 – MICRONIVELAMENTO DOS DADOS	97
5.3.6 – SIMULAÇÃO DE PROCESSAMENTOS UTILIZANDO DADOS SINTÉTICOS.....	99
5.3.7 – MÉTODOS UTILIZADOS PARA A INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	100
5.3.7.1 – ESPECTRO DE POTÊNCIA DOS DADOS MAGNÉTICOS.....	100
5.3.7.2 – FILTRAGENS DOS DADOS MAGNÉTICOS	102
5.3.8 – MÉTODOS SEMI-QUANTITATIVOS DE INTERPRETAÇÃO DOS DADOS MAGNÉTICOS	107

CAPÍTULO 6: AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS COM BASE EM ESTUDOS DE SIMULAÇÃO UTILIZANDO MODELOS MAGNÉTICOS

6.1 – INTRODUÇÃO.....	109
6.2 – EFEITOS NO ESPECTRO DE POTÊNCIA CAUSADOS POR ANOMALIAS TRUNCADAS.....	112
6.3 – EFEITOS NO ESPECTRO DE POTÊNCIA CAUSADOS POR ANOMALIAS RASAS	115
6.4 – TESTES DE APLICABILIDADE DO FILTRO DE REDUÇÃO AO PÓLO	121
6.4.1 – ANOMALIA DE FONTE PROFUNDA	122
6.4.2 – ANOMALIA TRUNCADA DE FONTE PROFUNDA.....	122
6.4.3 – ANOMALIAS DE FONTES RASAS.....	127
6.4.4 – TESTE PARA PRESENÇA DE FONTES EXTERNAS.....	127
6.5 – EFEITOS DE FONTES RASAS NO MAPA DE AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO.....	133

CAPÍTULO 7 – PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS MAGNÉTICOS DO CONVÊNIO GEOFÍSICA BRASIL-ALEMANHA

7.1 – INTRODUÇÃO	139
7.2 – PROCESSAMENTO DOS DADOS	139
7.2.1 – INTRODUÇÃO	139
7.2.2 – MAPA DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL	140
7.2.3 – ESPECTRO DE POTÊNCIA RADIAL MÉDIO DOS DADOS DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL	144
7.2.4 – MAPA DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL REDUZIDO AO PÓLO	144
7.2.5 – MAPA DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL	150
7.2.6 – MAPA DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL REDUZIDO AO PÓLO	153
7.2.7 – MAPA DE AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO	154

CAPÍTULO 8 - PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS DO PROJETO RIO DAS VELHAS

8.1 – INTRODUÇÃO	163
8.2 – REMOÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO REGIONAL DA TERRA	164
8.3 – TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	164
8.4 – GERAÇÃO DAS MALHAS REGULARES	167
8.5 – MICRONIVELAMENTO DOS DADOS	169
8.6 – PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS	170
8.6.1 – CÁLCULO DO ESPECTRO DE POTÊNCIA	175
8.6.2 – MAPA DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO	175
8.6.3 – FILTRO DE REDUÇÃO AO PÓLO	179
8.6.4 – MAPA DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL	183
8.6.5 – MAPA DE AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO	188
8.7 – PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	195
8.7.1 – INTRODUÇÃO	195
8.7.2 – MAPA DE CONTAGEM TOTAL	196
8.7.3 – MAPA DE POTÁSSIO	201
8.7.4 – MAPA DE TÓRIO	207
8.7.5 – MAPA DE URÂNIO	213
8.7.6 – MAPA DE RAZÕES	213
8.7.6.1 – MAPA DA RAZÃO TÓRIO/POTÁSSIO	219
8.7.6.2 – MAPAS DAS RAZÕES URÂNIO/POTÁSSIO E URÂNIO/ TÓRIO	223

8.7.7 – MAPA DO PARÂMETRO F.....	223
8.8 – PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE HELICOPTER ELETROMAGNETICS (HEM)	
8.8.1 – INTRODUÇÃO.....	233
8.8.2 – RESPOSTAS ESPERADAS PARA AS UNIDADES CONDUTORAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	241
8.8.3 – EFEITOS DO MANTO DE ALTERAÇÃO NOS LEVANTAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS.....	248
8.8.4 – ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO	249
8.8.5 – INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DOS DADOS ELETROMAGNÉTICOS DO PROJETO RIO DAS VELHAS	252
8.8.5.1 – GERAÇÃO DE MAPAS DE CONDUTIVIDADE	252
8.8.5.2 – MAPA DE CONDUTIVIDADE APARENTE: 935 Hz.....	259
8.8.5.3 – MAPA DE CONDUTIVIDADE APARENTE: 4175 Hz.....	259
8.8.5.4 – MAPA DE CONDUTIVIDADE APARENTE: 33000 Hz	260
8.9 – PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE VERY LOW FREQUENCY (VLF)	261

CAPÍTULO 9: CONCLUSÕES	263
-------------------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	275
---	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero e localização da área de estudo. (Modificado de Door 1969 e Ladeira 1991)	5
Figura 2.1	Região do Cráton do São Francisco (Modificado de Almeida 1977)	10
Figura 2.2	Mapa geológico simplificado do <i>Greenstone Belt</i> Rio das Velhas (Modificado de CPRM 1996)	16
Figura 2.3	Compartimentação tectônica do <i>Greenstone Belt</i> Rio das Velhas (Modificado de CPRM 1996)	17
Figura 2.4	Mapa geológico da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	26
Figura 2.5	Cavas ao longo do Lineamento São Vicente	43
Figura 2.6	Detalhe de uma das cavas do Lineamento São Vicente	43
Figura 3.1	Elementos do campo magnético da Terra para o Hemisfério Sul. D - declinação magnética, I - inclinação magnética, F - campo total, H - componente horizontal, X - componente este, Y - componente oeste, Z - componente vertical	53
Figura 3.2	Anomalias magnéticas causadas por esferas magnéticas em diferentes direções de inclinação do campo magnético terrestre	55
Figura 3.3	Modelos de anomalias magnéticas para placas finas de extensão infinita no plano perpendicular à folha de papel, com diferentes mergulhos e direções. Inclinação magnética: -30° , declinação magnética: 0° . Direções dos prismas: 90° (A), 60° (B), 30° (C) e 0° (D). Ângulos de mergulho dos prismas: 90° (I), 60° (II), 30° (III) e 0° (IV). (Fonte: Gunn 1998)	59
Figura 3.4	Espectro de raios-gama registrado a 100 m de altitude mostrando as janelas de potássio, urânio, tório e contagem total. (Fonte: Wilford et al. 1997)	62
Figura 3.5	Princípios gerais do método eletromagnético. Bobinas transmissora e receptora utilizadas e as linhas magnéticas dos campos primário e secundário correspondentes. (Fonte: Robinson & Çoruh 1988)	70
Figura 3.6	Campos magnéticos primários e combinação de primário e secundário no local de uma bobina de recepção de EM, e os sinais em fase e de quadratura que se somam para reproduzir o campo combinado. As amplitudes dos sinais em fase e de quadratura são medidas em cada posição de gravação ao longo das linhas transversais na área de levantamento. (Fonte: Robinson & Çoruh 1988)	70
Figura 3.7	Configuração básica para levantamentos eletromagnéticos transportados por helicóptero. (Fonte: Fraser 1978)	73

Figura 4.1	Mapa de localização do levantamento aerogeofísico do Projeto Rio das Velhas (contorno em preto dos blocos I a IV) e da direção das linhas de vôo (setas brancas) em relação às direções principais das unidades do <i>Greenstone-Belt</i> Rio das Velhas (contorno em máscara semi-transparente). A imagem de campo de intensidade magnética total foi utilizada como base para efeito de melhor visualização	82
Figura 4.2	Mapa de localização do levantamento aeromagnético (imagem de intensidade do campo magnético total) do Projeto Convênio Geofísica Brasil-Alemanha (CGBA), com detalhe em tracejado mostrando o Quadrilátero Ferrífero, região investigada	89
Figura 6.1	Representação do volume elementar de um prisma e do sistema de coordenadas associado. (Fonte: Bhattacharyya 1964)	110
Figura.6.2	Efeitos no espectro de potência causados por anomalias truncadas. (a) modelo de prisma central profundo, (b) modelo de prisma de borda profundo	113
Figura 6.3	Efeitos no espectro de potência causados por anomalias rasas. (a) modelo de 3 prismas rasos, (b) modelo de prisma profundo central somado a 3 prismas rasos, (c) modelo de prisma de borda profundo somado a 3 prismas rasos	117
Figura 6.4	Efeito de fontes profundas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de prisma central profundo, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do MagmapTM, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios	123
Figura 6.5	Efeito de fontes truncadas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de prisma de borda profundo, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do MagmapTM, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios	125
Figura.6.6	Efeito de fontes rasas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de 3 prismas rasos, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do MagmapTM, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios	129
Figura 6.7	Efeito de interferências externas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de prisma central profundo somado a 3 prismas rasos, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do MagmapTM, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios	131
Figura 6.8	Efeitos na amplitude do sinal analítico causados por diferentes posicionamentos das fontes	135
Figura 7.1	Mapa de intensidade do campo magnético total (Convênio Geofísica Brasil-Alemanha)	141
Figura 7.2	Espectro de potência radial médio dos dados magnetométricos do Convênio Geofísica Brasil-Alemanha	145
Figura 7.3	Mapa de intensidade do campo magnético total reduzido ao pólo (Convênio Geofísica Brasil-Alemanha)	147

Figura 7.4	Mapa de gradiente vertical dos dados de intensidade do campo magnético total (Convênio Geofísica Brasil-Alemanha).	151
Figura 7.5	Mapa de gradiente vertical dos dados de intensidade do campo magnético total reduzido ao pólo (Convênio Geofísica Brasil-Alemanha)	155
Figura 7.6	Mapa de amplitude do sinal analítico (Convênio Geofísica Brasil-Alemanha)	157
Figura 8.1	Dados do modelo do campo magnético regional (dados originais)	165
Figura 8.2	Mapa de intensidade do campo magnético total da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	171
Figura 8.3	Mapa de intensidade do campo magnético total micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	173
Figura 8.4	Espectro de potência radial médio da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	177
Figura 8.5	Mapa de intensidade do campo magnético total reduzido ao pólo da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	181
Figura 8.6	Mapa de gradiente vertical da intensidade do campo magnético total. Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	185
Figura 8.7	Mapa de amplitude do sinal analítico com contatos geológicos sobrepostos	189
Figura 8.8	Mapa de contagem total original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	197
Figura 8.9	Mapa de contagem total micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	199
Figura 8.10	Mapa de potássio original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	203
Figura 8.11	Mapa de potássio micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	205
Figura 8.12	Mapa de tório original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	209
Figura 8.13	Mapa de tório micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	211
Figura 8.14	Mapa de urânio original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	215
Figura 8.15	Mapa de urânio micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	217
Figura 8.16	Mapa da razão tório/potássio	221
Figura 8.17	Mapa da razão urânio/tório	225
Figura 8.18	Mapa da razão urânio/potássio	227
Figura 8.19	Mapa do Fator F	229
Figura 8.20	Mapa de resistividade aparente na frequência de 935 Hz	235

Figura 8.21	Mapa de resistividade aparente na frequência de 4175 Hz	237
Figura 8.22	Mapa de resistividade aparente na frequência de 33000 Hz	239
Figura 8.23	Perfis de levantamento HEM sobre condutores isolados de diferentes formas: placa horizontal, esfera e placa vertical. Para cada modelo, perfis de anomalias em fase (IP) e quadratura (Q) são apresentados para três frequências: 20 kHz (topo), 2 kHz e 0,4 kHz. Todas as transversais são sobre o centro dos condutores e normais à direção. Os condutores referentes às placas possuem uma condutância de 10 S e a esfera tem uma condutividade de 2,5 S/m. (Fonte: Palacky & West 1987)	243
Figura 8.24	Anomalias HEM teóricas em fase (IP) e em quadratura (Q) para frequências de 20 (topo), 2 e 0,4 kHz e modelos de placas condutoras com diferentes mergulhos. Arranjos adotados: horizontal coplanar (parte superior da figura) e coaxial (parte inferior). Respostas relativamente mais fracas são obtidas no modelo de placa vertical mesmo considerando o arranjo coaxial. (Fonte: Palacky & West 1987)	245
Figura 8.25	Anomalias HEM teóricas em fase (IP) e em quadratura (Q) para modelos de lâminas com condutividade de 2 S e diferentes comprimentos para frequências de 0,4, 2 e 20 kHz (da esquerda para a direita). O arranjo vertical coplanar (parte inferior da figura) mostra anomalias de menor amplitude e com maior distorções nas bordas que as correspondentes ao arranjo vertical coplanar (parte superior). (Fonte: Palacky & West 1987)	247
Figura 8.26	Respostas de um sistema HEM para uma camada sobreposta a um semi-espaco condutivo. As respostas no semi-espaco sofrem uma transição mais lenta do limite resistivo para o limite indutivo quando comparadas com as respostas da placa horizontal. As curvas estão representadas para um sistema coplanar horizontal com 7 m de separação entre bobinas e dependem somente do parâmetro de resposta adimensional. (Fonte: modificado de Mundry 1984)	250
Figura 8.27	Mapa de condutividade aparente micronivelado na frequência de 935 Hz	253
Figura 8.28	Mapa de condutividade aparente micronivelado na frequência de 4175 Hz	255
Figura 8.29	Mapa de condutividade aparente na micronivelado frequência de 33000 Hz	257

Contra capa Transparências referentes às figuras 1.1 e 2.4.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Síntese das principais propostas estratigráficas para o Grupo Nova Lima	19
Tabela 2.2	Síntese da evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero e adjacências (Endo 1997)	25
Tabela 2.3	Ocorrências de ouro na Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	45
Tabela 3.1	Quantidades magnéticas e suas unidades (Fonte: Sharma 1987)	50
Tabela 3.2	Relações entre K, U, Th e depósitos de elementos não-radioativos. (Fonte: Ostrovskii 1974)	64
Tabela 3.3	Classificação dos métodos eletromagnéticos. (Fonte: Hoover et al. 1984)	67
Tabela 4.1	Relação entre blocos levantados e direção das linhas vôo (Fonte: Brasil 1993)	81
Tabela 8.2	Espessura da camada, parâmetro t da equação 8.1, expresso em metros, correspondente ao valor de $R=10^{-1}$, frequências de 935, 4175 e 33000 Hz e resistividades (camada superior) de 20, 40 e 80 $\Omega.m$. Valores negativos indicam profundidades de investigação restrita ao espaço existente entre a aeronave e o solo	251

**RESPOSTA GEOFÍSICA DOS DEPÓSITOS DE OURO DA PORÇÃO CENTRAL DO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**

RESUMO

TESE DE DOUTORADO

Silvia Beatriz Alves Rolim

O Quadrilátero Ferrífero vem sendo palco de diversas campanhas de estudo há mais de um século, na tentativa de conhecer seu potencial metalogenético, assim como a complexa evolução tectônica registrada na sua arquitetura. Uma dessas campanhas consta do levantamento aerogeofísico do Projeto Rio das Velhas (PRV), cujas características de alta resolução motivaram a investigação de parte desses dados. A área selecionada apresenta uma série de depósitos auríferos associada a uma zona de cisalhamento de direção geral NW-SE caracterizada, preliminarmente, por uma associação dessa mineralização a uma intensa alteração hidrotermal e à presença de um rosário de corpos com condutividade elétrica mais elevada. Este trabalho apresenta os resultados obtidos a partir do re-processamento e interpretação de parte dos dados do PRV na porção central do Quadrilátero Ferrífero (QF) fornecendo subsídios às investigações geológicas convencionais, à análise metalogenética, bem como à identificação de ambientes favoráveis à mineralização aurífera. Inicialmente, foi feita uma síntese do conhecimento geológico e geofísico da área e das especificações e possibilidades de tratamentos dos dados aerogeofísicos. Na fase de tratamento dos dados magnetométricos a presença de anomalias truncadas, tanto impediu a caracterização das fontes profundas, quanto dificultou a interpretação das fontes rasas devido ao efeito de sobreposição das anomalias. O efeito desse truncamento também comprometeu a transformação de redução ao pólo que, nestas condições, tende a gerar feições espúrias. Apesar destes efeitos, a aplicação de rotinas de processamento adequadas, escolhidas a partir de estudos de simulação efetuada em computador, permitiu caracterizar a natureza das anomalias truncadas com base na utilização dos dados magnetométricos regionais do Convênio Geofísica Brasil-Alemanha. Uma vez entendidas as respostas magnéticas presentes na área, o problema da interferência de anomalias pode ser contornado utilizando na interpretação informações provenientes da aplicação de derivadas tais como, mapas de gradiente vertical e de amplitude do sinal analítico. A derivada vertical foi, particularmente, útil na caracterização e delimitação de uma porção da Zona de Cisalhamento São Vicente (ZCSV), que contém diversas ocorrências de ouro e apresenta anomalia magnética compatível a fontes com magnetização remanescente. As respostas radiométricas obtidas mostraram uma correlação entre o controle estrutural, a rocha hospedeira, a mineralização, o grau metamórfico e a alteração associada. Destes, a alteração hidrotermal, associada ao enriquecimento relativo de potássio, foi de relevada importância no mapeamento de áreas favoráveis à concentração de ouro. O tório apresentou uma depleção nessas condições e o urânio revelou um comportamento variado. As respostas dos sistemas eletromagnéticos (EM) (frequências de 935, 4175 e 33000 Hz) foram influenciadas pelo manto de alteração (até 100 m de espessura) em quase todas unidades da região estudada. As amplitudes dos campos eletromagnéticos (20 ppm para frequências mais altas) foram muito inferiores aos prescritos na literatura e os mapas de condutividade aparente calculados permitiram apenas um mapeamento sub-superficial. O arranjo horizontal coplanar (4175 Hz) mostrou-se mais sensível à presença de condutores horizontais, compensando o menor grau de penetração e a interferência de ruídos. Nos levantamentos EM foram observados valores de médios a altos sobre as unidades máfica-ultramáficas e metassedimentares pelíticas do Grupo Nova Lima. Valores semelhantes foram encontrados ao longo da ZCSV, representada por um “corredor” de condutividade com valores mais elevados na sua porção N e médios a altos na sua porção S. Por fim, considerando o expressivo número de ocorrências auríferas na parte sul do Lineamento São Vicente, pode-se cogitar que o processo de mineralização guarde uma associação com o evento específico que causou o alojamento de minerais magnéticos com atributos de remanescência ao longo da zona de falha. Esta hipótese, sugerida a partir da polaridade reversa da anomalia magnética, é reforçada pela sua correspondência com as respostas apresentadas nas anomalias radiométrica e eletromagnética, devendo ser considerada, tanto com fins prospectivos quanto em estudos tectônicos ou referentes à gênese das mineralizações.



**RESPOSTA GEOFÍSICA DOS DEPÓSITOS DE OURO DA PORÇÃO CENTRAL DO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO, MG**

ABSTRACT

TESE DE DOUTORADO

Silvia Beatriz Alves Rolim

The Quadrilátero Ferrífero is the most intensively studied area in Brazil due to its metallogenic potential and its complex geological evolution. One of the most important investigations of this region was the aerogeophysical survey of the Rio das Velhas Project (gamma-ray, magnetic and electromagnetic data). The high-resolution characteristics of this project have provided several studies in this region. However, some of the outlined goals haven't been reached, because it is possible to recognize new relationships between geophysical features and mineralization environments. Analysis of gamma-ray data from a selected area where a series of gold deposits are associated with a NW/SE-trending shear zone has identified an association with mineralization processes and intense hydrothermal alteration. Electromagnetic anomalies are shown as a line bodies with significant electric conductivity. In addition, magnetic anomalies are associated with higher amplitudes, despite the interferences caused by anomalies from deeper sources in the region. The present research was aimed at investigating the geophysical response of the gold deposits in suitable environments with the use of aerogeophysical data supported by studies of background geology. A review of the geological and geophysical knowledge of the area and an evaluation of the possibilities of the processing of the aerogeophysical data were made. During the processing of the magnetic data, the truncated anomalies prevented the characterization of the deep sources, masking the interpretation of the shallow sources due to overlapping of anomalies. The effect of the truncation restricts the use of the reduction-to-pole, which generates features that do not correspond to reality. From this, two questions could be answered. First is related to the origin and characterization of the truncated anomalies that was solved through processing and interpreting magnetic regional data from the Brazil-Germany Geophysical Covenant. The second is related to the forecast of the response of magnetic data to general processing that was based on simulation studies using magnetic models. Once the magnetic response in this area was understood, anomalies interference problems could be resolved using information derived from the application of techniques, such as vertical gradient maps and amplitude of the analytical signal. The vertical gradient was particularly useful in the delimitation and characterization of a portion of the São Vicente Shear Zone that presents compatible anomalies to sources with total magnetization of strong remanence and, in this case, associated with concentrations of gold. The analytical signal has reinforced the interpretation of the vertical gradient map that shows a greater magnetization degree to the mineralization. The gamma-ray responses obtained have demonstrated the existence of a relationship between structural control, host rock, mineralization, metamorphic grade and hydrothermal alteration. Out of these, hydrothermal alteration, associated to relative enrichment of Potassium, was of great help to map areas of favorable gold concentration. Thorium was depleted under these conditions and Uranium presented a varied behavior. Responses of the electromagnetic system (frequencies of 935, 4175 and 33000 Hz) were influenced by the effect of weathering cover (up to 100 m thick) in almost all units of the region studied. The amplitudes of the electromagnetic field (20 ppm for higher frequencies) were much lower than the expected and the apparent calculated conductivity maps permitted only a superficial mapping of the area. The horizontal coplanar array (4175 Hz) permitted a higher grade of penetration and was most sensitive to the presence of the horizontal conductors, compensating the lower penetration grade and the noise interferences in high frequencies. Medium to high values of apparent conductivity have been observed, corresponding to mafic-ultramafic and metapelitic rocks from Nova Lima Group. Similar values are found along the São Vicente Shear Zone, represented by a "conductivity corridor" with high values in its northern sector and medium to high in its southern sector. Finally, considering the significant number of gold occurrences along the southern São Vicente lineament, it can be considered that mineralization processes are associated with the specific geological event, which aligned the magnetic material with reminiscence features along the fault zone. This possibility, as suggested by the magnetic anomaly signature, is re-enforced by its close correspondence with the electromagnetic and gamma-ray anomalies. Therefore, it must be considered in prospective and tectonic studies about the genesis of the mineralization.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - RELEVÂNCIA DO TEMA

Considerado uma das principais províncias auríferas do mundo, o Quadrilátero Ferrífero vem sendo palco de diversas campanhas de estudo há mais de um século, na tentativa de conhecer seu potencial metalogenético, assim como a complexa evolução tectônica registrada na sua atual arquitetura.

No que se refere aos estudos geofísicos, até o final da década de 1980 a contribuição foi pouco expressiva apesar do grande acervo de dados existente (CPRM 1995). Dados gravimétricos, sísmicos e, secundariamente, magnéticos foram interpretados e auxiliaram na definição de importantes estruturas regionais do Cráton do São Francisco e faixas móveis adjacentes (Bossum 1973, Corrado *et al.* 1979, Motta *et al.* 1981, Haralyi & Hasui 1982, Padilha 1983, Ussami & Bott 1989, entre outros). No entanto, esses dados não foram explorados em todo o seu potencial.

A década de 1990 foi marcada pelo desenvolvimento de ferramentas de aquisição, processamento e integração de dados como subsídio aos métodos tradicionais de investigação. O novo contexto incentivou uma retomada dos estudos geofísicos dada a capacidade destes dados registrarem variações sutis de propriedades físicas, muitas vezes, fundamentais na exploração mineral em várias escalas de mapeamento, principalmente em áreas de difícil acesso. Como resultado, diversos levantamentos geofísicos foram propostos, fomentando o desenvolvimento de novas estratégias de exploração mineral.

Seguindo esta tendência, foi criado em 1991 o Programa Distritos Mineiros da Divisão de Geologia do Departamento Nacional de Produção Mineral (DIGEO/DNPM) visando integrar informações e realizar estudos de detalhe, com especificações de última geração como auxílio à definição de controles das ocorrências minerais em terrenos do tipo *greenstone belt*. Parte deste programa denomina-se Projeto Rio das Velhas (PRV) e consta de um levantamento aerogeofísico de alta resolução na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, numa área de aproximadamente 1700 km² (Brasil 1993). Conforme Isles *et al.* (1990) e Bullock & Isles (1994), o termo “alta

resolução” refere-se a levantamentos voados a baixas altitudes sobre o terreno (≤ 80 m), com pequeno espaçamento entre linhas (100-300 m), sendo os dados registrados a altas taxas de amostragens (intervalo de amostragem de 3,5 a 15 m) e adquiridos com sensores de alta sensibilidade, como é o caso de magnetômetros de vapor de césio (resolução entre 0,001 e 0,005 nT). No caso da aerogamaespectrometria, que na grande maioria das vezes acompanha a aeromagnetometria, a evolução passou pelos cintilômetros de contagem total e instrumentos de quatro canais (situação do PRV), até os espectrômetros digitais multicanais atuais, resultando num aumento efetivo de até 80% do sinal registrado. Além disso, janelas menores de amostragem (até 0,5 s) permitem um melhor diagnóstico e individualização de unidades geológicas. Hoje em dia, algumas destas especificações vêm se refinando, como a altura dos sensores que, no PRV, foi de até 30 m sobre o terreno. A melhor qualidade dos dados aerogeofísicos, além de estimular o desenvolvimento de modelos exploratórios (Vieira 1997, Silva 1999, Tavares 1998), estimula a avaliação de diversas técnicas de processamento e interpretação aerogeofísicas.

Com base nestes aspectos, foi selecionada uma área na porção central do Quadrilátero Ferrífero, onde uma série de depósitos auríferos ocorre associada a uma zona de cisalhamento de direção geral NW-SE. Tendo sido descobertos e lavrados durante o século XVIII, atualmente tais depósitos correspondem a uma centena de escavações superficiais, a maioria abandonada ou desativada. Entretanto, uma avaliação preliminar dos dados aerogeofísicos do PRV realizada no presente trabalho indicou uma associação dessa mineralização a uma intensa alteração hidrotermal e à presença de um rosário de corpos com condutividade elétrica mais elevada. Além disso, algumas anomalias magnéticas apresentam maiores amplitudes que são identificadas, apesar da interferência causada por anomalias de fontes mais profundas existentes na região.

Dentro deste contexto, a área investigada revela-se ideal para estudos de modelagem e análise de dados aerogeofísicos como subsídio às investigações geofísica e geológica convencionais e à análise metalogenética. Além disso, considerando a disponibilidade de dados em diversos distritos mineiros do Brasil, os

resultados discutidos e apresentados no presente trabalho podem ser aplicados em outras áreas, auxiliando na pesquisa e exploração mineral.

1.2 - OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo fundamental caracterizar a resposta geofísica de depósitos de ouro em ambientes favoráveis da porção central do Quadrilátero Ferrífero, através do processamento e da integração de dados aerogeofísicos (magnetométricos, gama-espectrométricos, eletromagnéticos e geológicos).

Mais especificamente, o trabalho se propôs a:

- Avaliar a qualidade da base de dados geofísicos nas suas fases de aquisição e pré-processamento;
- Avaliar as técnicas de tratamento de dados com base em estudos de simulação, utilizando anomalias sintéticas geradas por computador, a partir de modelos geológicos específicos;
- Selecionar metodologias adequadas para o processamento e tratamento dos dados aerogeofísicos, com base nas características geofísicas e geológicas da região estudada e nos resultados dos testes sintéticos;
- Identificar e avaliar as anomalias originadas na borda da janela de dados do PRV, a partir da interpretação dos dados magnetométricos do Convênio Geofísica Brasil-Alemanha (CGBA);
- Definir o arcabouço estrutural regional da área adjacente ao PRV, através da análise e interpretação dos dados magnetométricos do CGBA nesta vizinhança;
- Definir o arcabouço geofísico da área através da delimitação da distribuição espacial das principais unidades presentes;
- Caracterizar os padrões de respostas geofísicas de ambientes geológicos hospedeiros da mineralização aurífera;
- Mapear a distribuição relativa dos radioelementos naturais, K, U e Th para a posterior caracterização de litotipos e de zonas de alteração hidrotermal;

- Avaliar a resposta do sistema do levantamento eletromagnético ao modelo do semi-espço utilizado no cálculo das resistividades aparentes;
- Estimar a profundidade aparente alcançada para cada uma das freqüências trabalhadas no método eletromagnético;
- Mapear a distribuição de corpos e camadas com condutividade aparente expressiva;
- Integrar dados aerogeofísicos, geológicos e topográficos na avaliação do controle das mineralizações auríferas e subsidiar modelos de exploração geofísica em terrenos do tipo *greenstone belt*;
- Definir modelos de resposta geofísica para a localização de novos alvos;
- Subsidiar modelos de exploração geofísica em áreas já conhecidas, assim como naquelas onde há pouca ou nenhuma informação.

1.3 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área investigada encontra-se na porção central do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais e possui, aproximadamente, 560 km², ocupando parte das folhas Rio de Pedras, Itabirito, Gandarela e Rio Acima (Figura 1.1).

1.4– DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este trabalho é organizado em nove capítulos, iniciando com a apresentação da relevância da proposta submetida e das metas a serem alcançadas, fornecendo uma visão geral e sintética de sua evolução.

O Capítulo 2 apresenta uma síntese geológica do Quadrilátero Ferrífero e das principais propostas de modelos de evolução tectônica, fornecendo um quadro sinóptico da arquitetura dos terrenos do tipo *greenstone* da região. Posteriormente, são discutidos aspectos da área investigada que salientam algumas características geológicas, estruturais, mineralógicas, entre outras, reconhecidas por diversos autores e de relevada importância no apoio à interpretação dos dados aerogeofísicos desenvolvida nos capítulos 7 e 8.

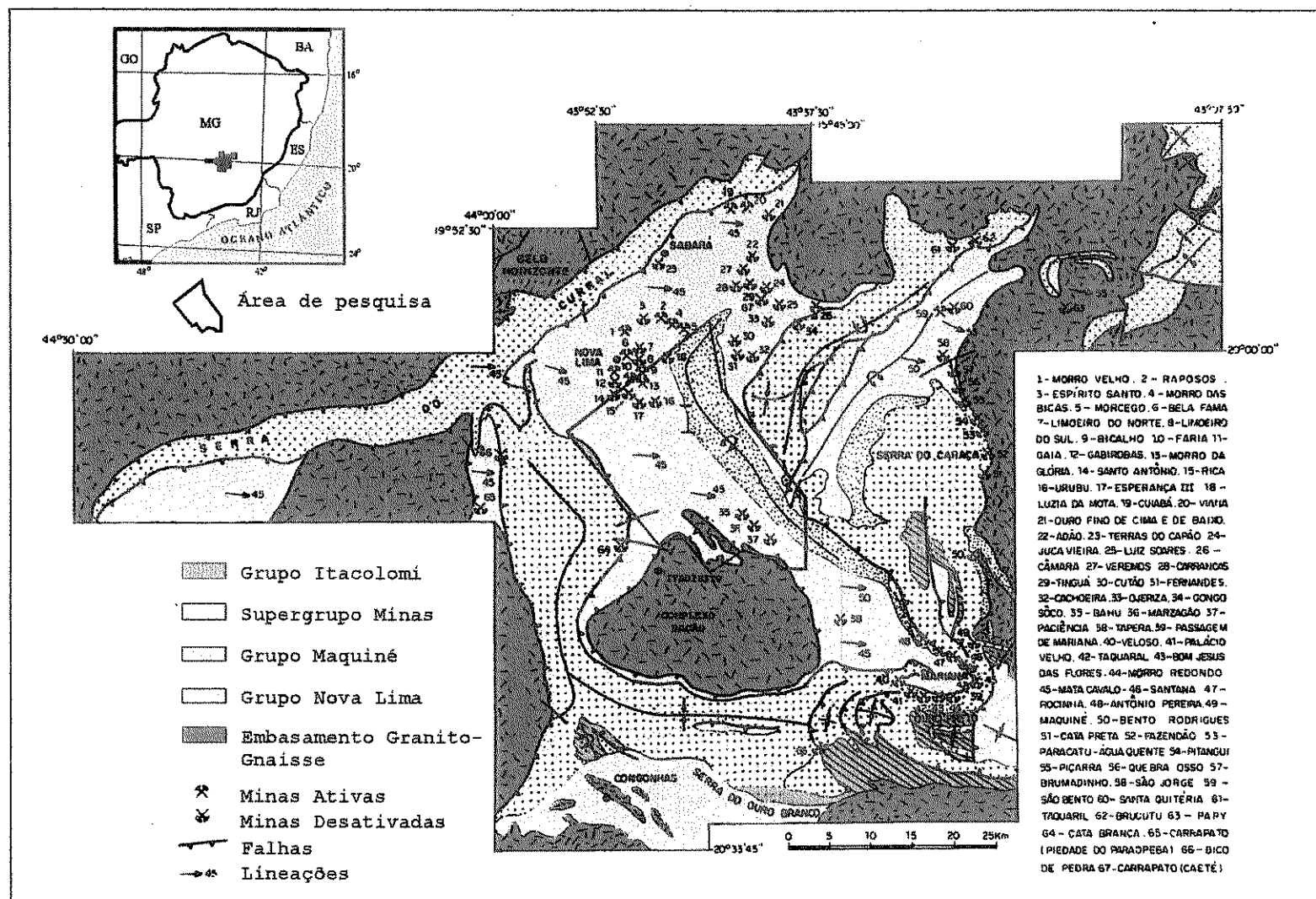


Figura 1.1 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero e localização da área de estudo. (Modificado de Door 1969 e Ladeira 1991).

O Capítulo 3 introduz uma revisão sobre a aplicação e a importância dos métodos geofísicos na exploração de ouro em terrenos do tipo *greenstone belt*. São feitas considerações teóricas e uma discussão sobre o nível atual do conhecimento, fornecendo um ferramental mínimo para a compreensão do trabalho.

No Capítulo 4 são apresentadas as especificações dos bancos de dados utilizados, que servem de referência para as fases de modelagem, processamento e interpretação dos dados geofísicos.

O Capítulo 5 faz uma revisão sobre tratamento de dados geofísicos, incluindo uma descrição da fase de pré-processamento realizada pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), bem como uma discussão sobre os processamentos desenvolvidos nesse trabalho e suas aplicações em situações semelhantes.

Uma vez fornecidas as condições adequadas para o entendimento do contexto geológico e geofísico da área, assim como das especificações e possibilidades de tratamentos dos dados geofísicos, é possível tecer alguns questionamentos sobre a resposta dos dados magnetométricos à aplicação de processamentos geralmente utilizados. Essa etapa é apresentada no Capítulo 6 através da avaliação das técnicas de realce aplicadas aos dados magnetométricos com base em estudos de simulação utilizando modelos magnéticos.

A partir da simulação das respostas magnéticas obtidas para diversas situações encontradas na área, os capítulos 7 e 8 apresentam os resultados das etapas de processamento e interpretação dos dados do CGBA (magnetométricos) e PRV (magnetométricos, gamaespectrométricos e eletromagnéticos). Para uma melhor visualização das análises e resultados discutidos nesses capítulos, transparências referentes aos mapas geológicos do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1.1) e de sua porção central – a área de estudo (Figura 2.4), encontram-se anexadas na contracapa deste volume e podem ser sobrepostas aos diversos mapas apresentados. Com relação à área de estudo, o leitor pode recorrer a duas versões de transparência: colorida e em níveis de cinza.

O trabalho é finalizado com o Capítulo 9 que apresenta as conclusões da pesquisa, contribuindo com sugestões de alternativas de abordagem para a exploração mineral.

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma síntese das principais idéias a respeito da evolução do conhecimento geológico do Quadrilátero Ferrífero, assim como de sua evolução tectônica. Posteriormente, são discutidos os aspectos geológicos da área investigada, suas características tectono-estruturais, além das principais mineralizações auríferas.

2.2 - CONTEXTO GEOLÓGICO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero posiciona-se no extremo sul do Cráton São Francisco, que é limitado por faixas móveis de idade brasileira (Almeida 1977, Almeida & Hasui 1984, Almeida *et al.* 2000) (Figura 2.1). De uma forma geral, o Quadrilátero Ferrífero é caracterizado por terrenos granito-gnáissicos (TGGs) arqueanos e paleoproterozóicos; uma seqüência vulcanossedimentar arqueana do tipo *greenstone belt* (Supergrupo Rio das Velhas - SGRV) e seqüências metassedimentares supracrustais proterozóicas (Supergrupo Minas - SGM, Grupo Itacolomi -GI e Supergrupo Espinhaço - SGE) (Dorr 1969, Schorscher 1979a e 1979b, Noce *et al.* 1996).

Os TGGs são compostos por gnaisses bandados, de composição tonalítica a granodiorítica, mostrando graus variados de migmatização e características químicas equivalentes às das suítes arqueanas do tipo TTG^{2.1} (Noce 1995). Esses terrenos estão representados pelos complexos metamórficos Bação, Bonfim, Belo Horizonte e Caeté, que segundo Machado & Schrank (1989), Machado *et al.* (1992), Machado & Carneiro (1992), Noce (1995) e Teixeira (1996), apresentam idades entre 3,38 a 2,86 Ga.

^{2.1} Tonalito-trondhjemitó-granodiorito

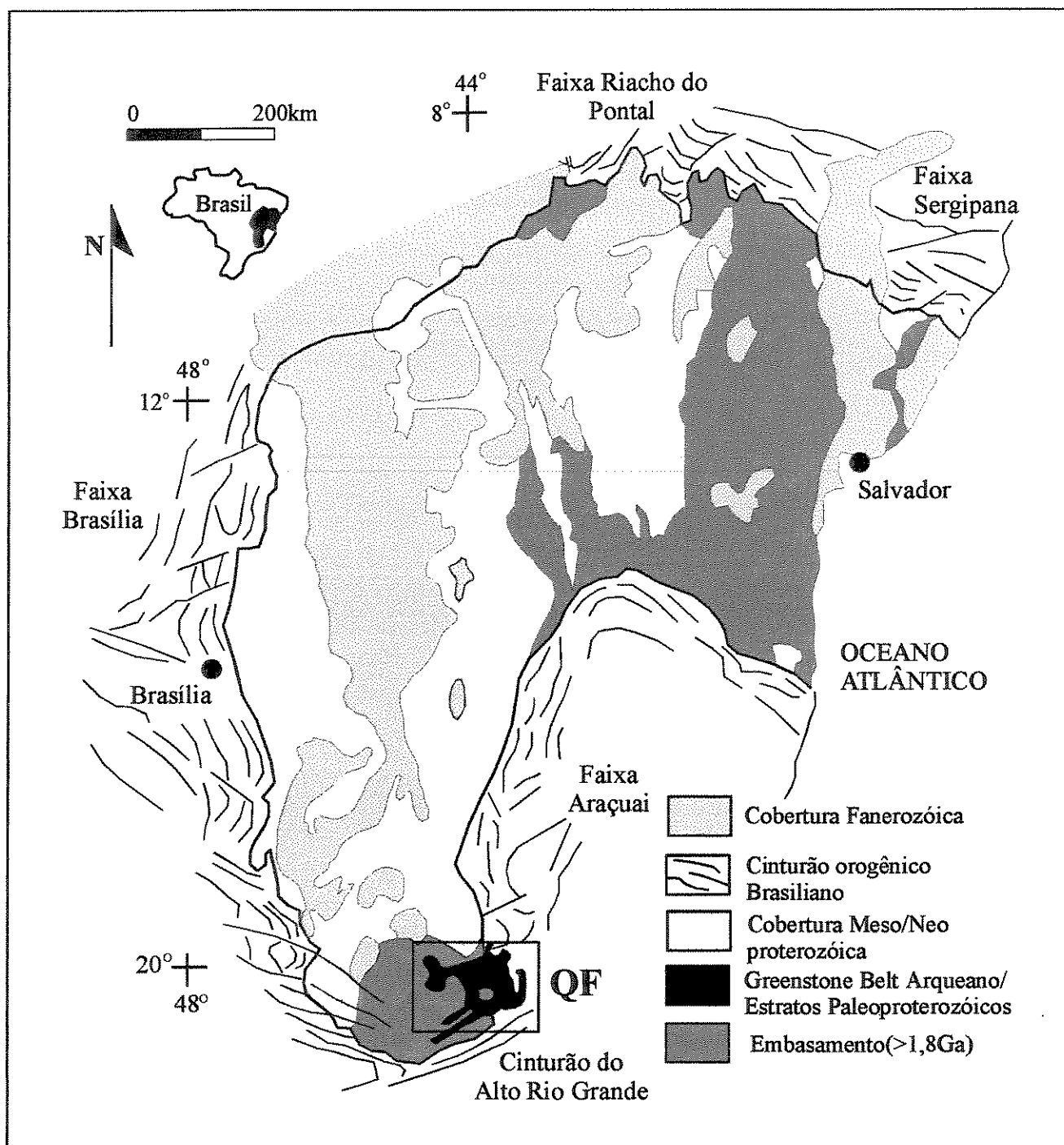


Figura 2.1 – Região do Cráton São Francisco (modificado de Almeida 1977).

De uma forma geral, os TGGs apresentam contatos tectônicos com o *greenstone belt* e exibem três etapas de granitogênese em seus terrenos:

- 2,78 a 2,77 Ga (Noce *et al.* 1996): contemporâneo ao vulcanismo félsico do *Greenstone Belt* Rio das Velhas - GBRV;
- 2,72 a 2,7 Ga (Machado *et al.* 1992 & Noce *et al.* 1996): idade mínima da última deformação neoarqueana registrada nos complexos metamórficos Bonfim e Belo Horizonte;
- 2,612 (Noce 1995) e 2,593 Ga (Romano 1989): estágios finais de cratonização anterior à deposição do SGM.

Estas unidades estão representadas, na porção sul da área investigada, pelo Complexo Metamórfico Bação - CMB (Dorr & Barbosa 1963, Guimarães *et al.* 1966, Herz 1970 e Schorscher 1976), por sua vez caracterizado por gnaisses bandados de composições tonalítica-trondhjemitica a granodiorítica, além de níveis concordantes de rochas metassedimentares (Endo 1997). Suas paragêneses minerais são de alto grau metamórfico e há registros de corpos intrusivos de natureza granítica ou granodiorítica (Herz 1970, Riccomini & Amaral 1980).

A seqüência do tipo *greenstone* é representada na sua base pelo GNL - GNL, que consiste em uma sucessão metavulcano-sedimentar polideformada em condições metamórficas de fácies anfibolito, com retrometamorfismo em fácies xisto-verde (Ladeira 1980, Carneiro 1992 e Endo 1997). Este grupo é formado por uma unidade inferior metavulcânica ultramáfica, uma unidade intermediária vulcanossedimentar félsico-máfica e uma superior, químico-clástica (Ladeira 1980 e 1985). Sobrepondo o GNL, ocorrem rochas metassedimentares predominantemente quartzíticas pertencentes ao Grupo Maquiné – GM (Dorr, 1969). Machado *et al.* (1992) realizaram datações U/Pb em zircões de rochas metavulcânicas félsicas da base desta seqüência, indicando sua deposição em torno de 2,776 Ga. Schrank & Machado (1996) dataram grãos detríticos das unidades metassedimentares do topo do *greenstone* e obtiveram idades que variam de 3,5 a 2,857 Ga, indicando uma idade mínima para a sua deposição.

As rochas metassedimentares que constituem o SGM são predominantemente plataformais e encontram-se sobrepostas às rochas do GBRV e dos TGGs, em nítida discordância angular erosiva (Dorr 1969). São representadas por uma unidade basal clástica, uma intermediária clástico-química (com formações ferríferas bandadas - ffbs do tipo Lago Superior) e uma clástica superior (Derby 1906, Dorr 1969). Segundo Endo (1997), estas rochas foram submetidas, de uma forma geral, a um metamorfismo na fácies xisto verde, chegando à fácies anfibolito na porção oriental do Quadrilátero Ferrífero (Fig 1.1).

A idade máxima para a deposição dos sedimentos da base destas unidades está entre 2,612 e 2,42 Ga (Noce 1995 e Babinski *et al.* 1993). Machado *et al.* 1996 relacionam a deposição dos sedimentos superiores à orogênese transamazônica entre 2,125 e 2,03 Ga.

Existe uma série de propostas de divisão estratigráfica para o Quadrilátero Ferrífero fundamentada, principalmente, nos trabalhos pioneiros de mapeamento geológico do *United State Geological Survey* (USGS) e DNPM realizados na primeira metade do século XX. Nesta época, foram mapeados a base (GNL) e o topo (GM) da então denominada Série Rio das Velhas (Dorr *et al.* 1957), sendo o último subdividido nas formações Palmital (O'Rourke 1958) e Casa Forte (Gair 1962).

Além dessas, várias subdivisões foram adicionadas (Harder & Chamberlin 1915, Lacourt 1936, Guimarães 1951, Barbosa 1954, Guild 1957) com descrição e nomenclatura detalhadas dos litotipos das quarenta e sete quadriculas mapeadas. Estes resultados foram apresentados num trabalho de revisão fisiográfica, estratigráfica e estrutural do Quadrilátero Ferrífero publicado por Dorr (1969).

Nas décadas de 1970 e 1980 novas nomenclaturas, divisões e subdivisões litoestratigráficas foram propostas, destacando-se os trabalhos de Almeida (1976), Schorscher (1976 e 1978), Menezes Filho *et al.* (1977), Ladeira (1980, 1985 e 1988), Riccomini & Amaral (1980), Amaral *et al.* (1976), Riccomini (1982), Schorscher *et al.* (1982), Oliveira *et al.* (1983), Padilha (1984), Alkmim (1985 e 1987), Belo de Oliveira (1986), Oliveira (1986), Vial *et al.* 1987, Vieira & Oliveira (1988). Neste período, a então Série Rio das Velhas foi caracterizada como uma unidade do tipo *greenstone belt*, apoiada em dados geocronológicos e na descoberta de lavas komatiíticas com

estruturas *spinifex* na base deste grupo (Schorscher 1976 e 1978, Almeida 1976). Em adição, Ladeira (1980, 1985 e 1988) dividiu o GNL em três unidades: metavulcânica inferior (rochas ultramáficas e máficas), metassedimentar química (Formação Lapa Seca^{2.2} e Formação Ferrífera Bandada Raposos) e clástica superior (metaconglomerados, quartzitos e filitos grafitosos).

No que se refere ao GBRV, a década de 1990 foi marcada pela tentativa de revisão e reorganização sistemática de seu conhecimento geológico fragmentado em trabalhos pretéritos, muitas vezes localizados e de difícil correlação (Noce *et al.* 1990, Ladeira 1991, Noce *et al.* 1992, Schrank & Silva 1993).

Em 1992 foi realizado um mapeamento geológico sistemático, em escala de 1:25.000 (PRV), numa área de aproximadamente 1700 Km² que cobriu a maior parte do GBRV. O objetivo foi subsidiar a definição dos controles das mineralizações existentes, complementando os estudos integrados (informações geoquímicas, aerofotogramétricas, petrográficas, topográficas, geofísicas, entre outras) e contribuindo para a descoberta de novos depósitos minerais (BRASIL, 1993). Como resultado, foram gerados vinte e seis mapas geológicos para as cartas topográficas correspondentes (escala: 1:25.000) e um mapa geológico integrado para o *greenstone* (escala 1:100.000) (Pinto *et al.* 1996). A Figura 2.2 apresenta uma versão simplificada do mapa integrado.

Outro resultado deste estudo foi a proposta informal da divisão do GBRV em unidades litoestratigráficas, distribuídas em quatro blocos tectônicos característicos de ambientes petrogenéticos distintos. O critério adotado pela CPRM na delimitação desses domínios foi a presença de grandes lineamentos estruturais, não havendo uma proposta de relação evolutiva entre os mesmos. São eles: Blocos Nova Lima, Caeté, São Bartolomeu e Santa Bárbara (Figura 2.3).

^{2.2} Termo usado pelos mineiros para descrever uma rocha maciça ou finamente bandada, composta por dolomita, ankerita, quartzo, e plagioclásio. Em alguns locais pode se dar o desenvolvimento de carbonato. Sua cor varia de bege a cinza, apresentando intensa alteração hidrotermal. Existem várias hipóteses para a origem da Lapa Seca, entre elas, vulcânica, sedimentar química ou vulcano-sedimentar.

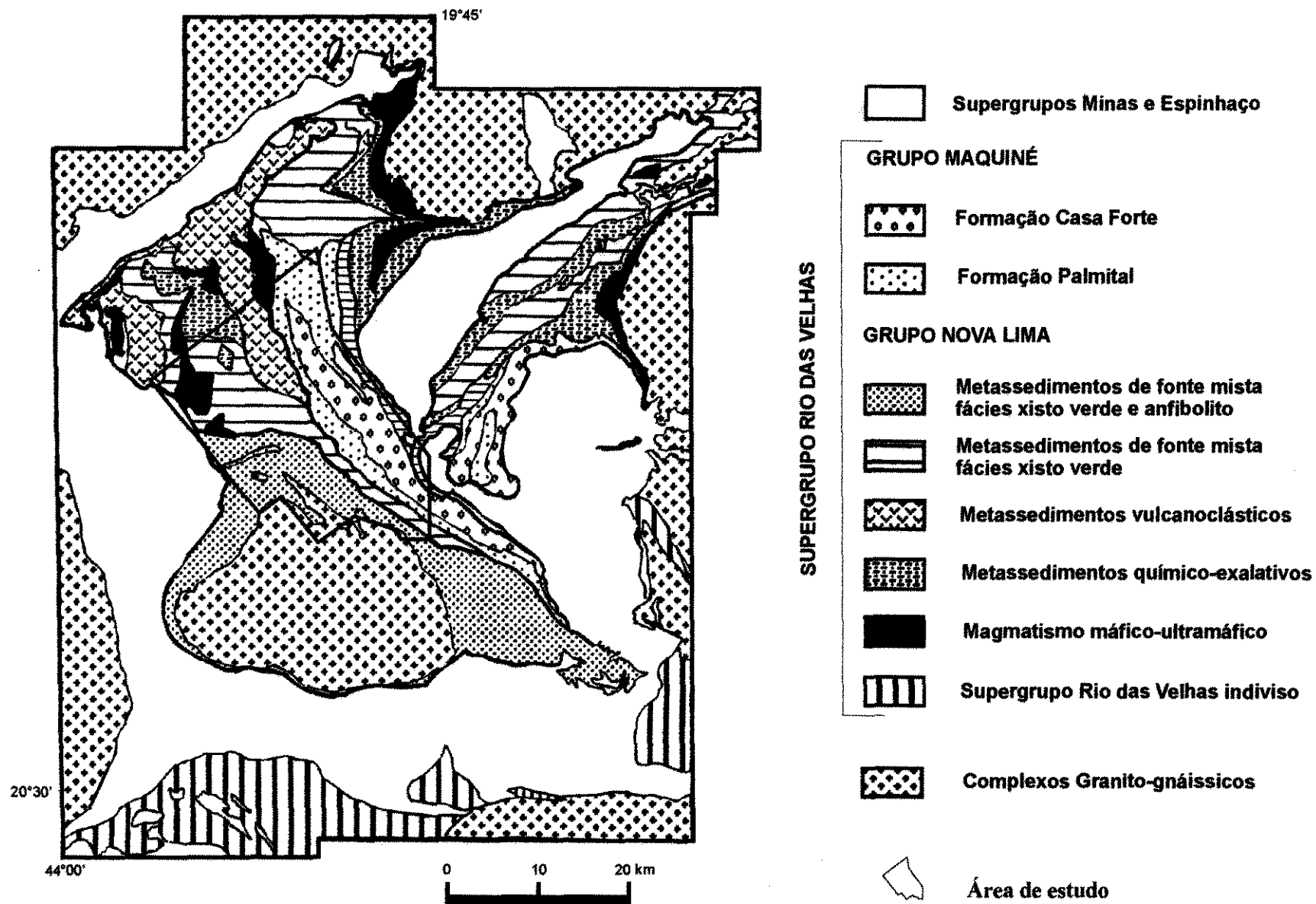
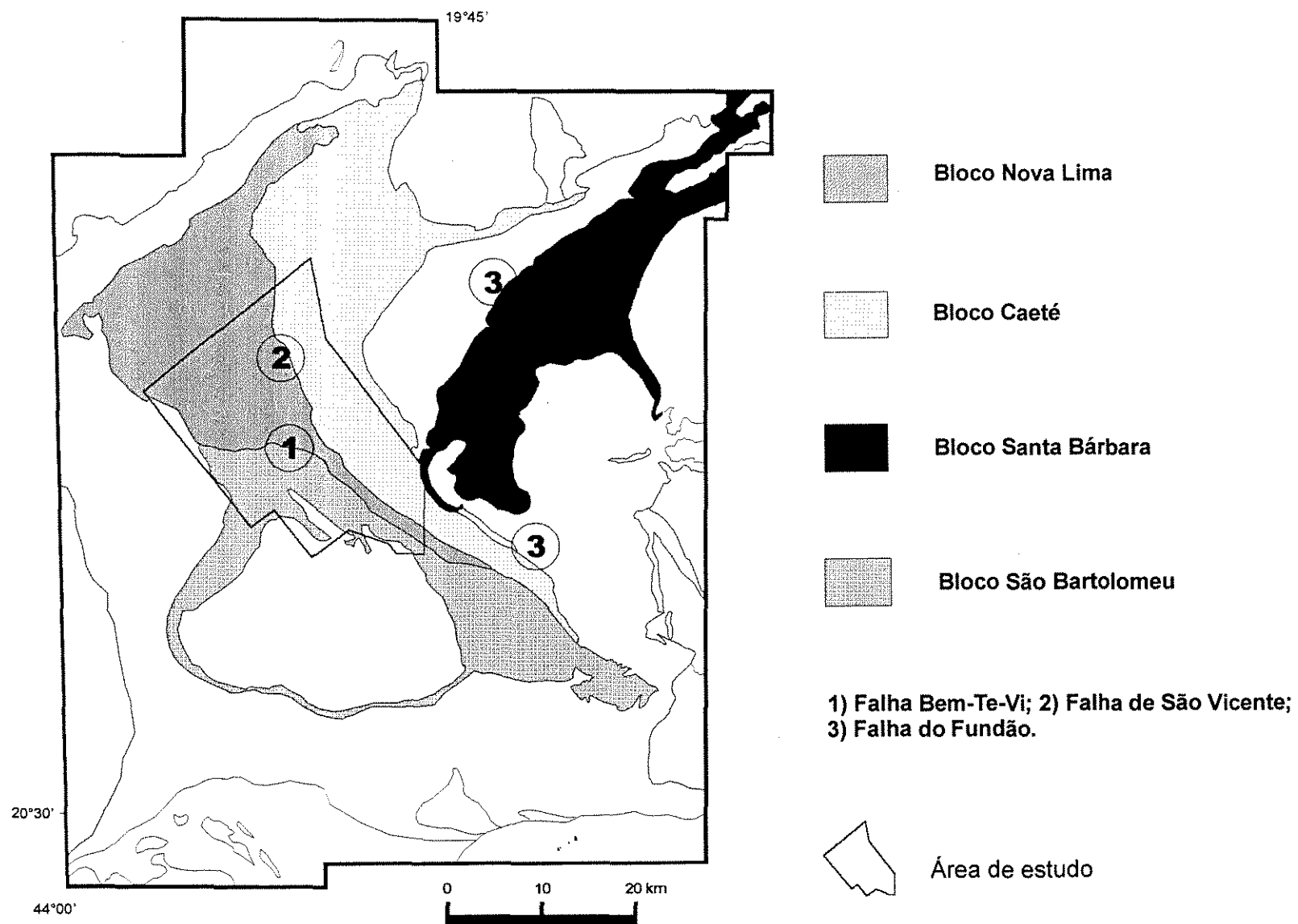


Figura 2.2 - Mapa geológico simplificado do *Greenstone Belt* Rio das Velhas (Modificado de CPRM 1996).



O Bloco Nova Lima é caracterizado da base para o topo por seqüências metavulcânicas básico-ultrabásicas, metavulcanoclásticas e metassedimentares metamorfizadas na fácies xisto verde. Este bloco é limitado pelas falhas Bem-Te-Vi (a SW) e São Vicente (a NE) e não há registros das unidades do GM.

O Bloco Caeté seria o único compartimento que apresenta uma coluna estratigráfica completa referente à seqüência do *greenstone*. São rochas metavulcânicas básicas-ultrabásicas, metavulcanoclásticas e metassedimentares clásticas não marinhas. Seus limites são estabelecidos pelas falhas Fundão-Cambotas a NE e São Vicente a SE.

O Bloco Santa Bárbara é caracterizado por seqüências metassedimentares e metavulcânicas ultramáficas. Estão presentes formações ferríferas bandadas – ffbs intercaladas a metassedimentos clásticos finos.

O Bloco São Bartolomeu posiciona-se em volta do CMB e é limitado a norte pela Falha Bem-Te-Vi e a sul pela Falha São Vicente. Caracteriza-se por unidades metassedimentares clásticas grosseiras, carbonáticas e ferruginosas. Estas rochas diferenciam-se das demais pelo grau metamórfico mais elevado, fácies anfibolito, além da natureza distinta de sua sedimentação. Não foram observadas evidências de vulcanismo básico-ultrabásico presentes nos demais blocos. Além de vulcanogênicas, são sugeridas fontes graníticas para a composição destas rochas, corroborando para uma reavaliação quanto ao seu ambiente de sedimentação.

Com base na integração de todos os resultados do PRV, foi proposta uma coluna estratigráfica para o *greenstone belt* homônimo (CPRM 1996). Nela, o GNL teria sido formado, em sua base, por rochas vulcânicas e plutônicas de composição tholeítica a komatiítica, sucedida por dois tipos de seqüências: uma vulcânica intercalada com sedimentos químico-exalativos e outra vulcanoclástica/ epiclástica sub-aquática. No topo teriam sido depositadas duas coberturas sedimentares clásticas: uma marinha e outra não-marinha. O GM teria evoluído a partir de uma base sedimentar marinha rasa a litorânea, seguida de uma cobertura sedimentar continental, representando uma associação metassedimentar clástica não-marinha. A Tabela 2.1 apresenta a síntese das principais propostas estratigráficas para o GNL, incluindo a do projeto supracitado.

Tabela 2.1 - Síntese das principais propostas estratigráficas para o Grupo Nova Lima.

GRUPO	NOVA LIMA											
	Door (1969)	Ladeira (1980)		Oliveira <i>et al.</i> (1983)		Oliveira (1986)		Vieira & Oliveira (1988)		Vieira <i>et al.</i> (1991)		CPRM (1996)
		Unidade Clástica	Grauvaca, quartzito, quartzito-xisto, conglomerado	Unidade Superior	Metapelito, metassedimento químico e Lapa Seca	Unidade metassedi- mentar psamítica	Unidade metassedi- mentar indivisa	Metapelito, metatufofélsico, quartzito, metaconglomerado. Metapelito, metatufo e Lapa Seca	Unidade Superior	Metapelito com tufito félsico, quartzito, metaconglo metrado	Associação metassedi- mentar clástica marinha (ressedimen- tada)	
	Indiviso	Unidade Metassedi- mentar Química	Sedimento carbonático, filito, FFb, xisto tufáceo, xisto grafitoso	Unidade Média	Metandesito, FFb, metavulcânica félsica, vulcanoclástica, filito grafitoso	Unidade metavulcânica ácida e intermediária		Metandesito basáltico com FFb, metatufo félsico, metapelito, filito grafitoso	Unidade Média	Brecha andesítica e lapilli tufo. Tufito félsico e metapelito	Associação metavulca- nossedimen- tar clástica	
	Unidade Metavulcânica	Metabasalto, metaultra- máfica, xisto tufáceo	Unidade Inferior	Metandesito, metabasalto, filito grafitoso e vulcânica félsica, FFb	Unidade metassedi- mentar pelítica	Unidade metavulcâ- nica máfica e utramáfica	Metandesito basáltico com FFb, filito grafitoso, metatufo, FFb, metaultramáfica, basalto	Unidade Inferior	Associação metassedi- mentar química- pelítica	Associação metavulcano- sedimentar química	Associação metavulcâni- ca a plutônica máfica- ultramáfica	

2.3 - SÍNTESE DOS MODELOS PROPOSTOS DE EVOLUÇÃO TECTÔNICA PARA O QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A evolução tectônica desta região é complexa e de difícil entendimento, fruto da superposição heterogênea de eventos deformacionais iniciados no Arqueano (Endo 1997). Apesar de possuir algumas etapas de desenvolvimento bem caracterizadas e consensuais à maioria dos pesquisadores, a evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero ainda é motivo de muito debate. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser encontrados nas revisões de Chemale Jr. *et al.* (1991a e 1991b), Toledo (1997), Endo (1997) e Alkmim & Marshak (1998).

As tentativas de reconstrução da evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero remontam ao final do século XIX e início do XX, nos trabalhos descritivos sobre sua estruturação e deformação (Ferrand 1894, Derby 1906, Harder & Chamberlin 1915).

Já nas décadas de 1930 e 1940, além de importantes estudos de detalhe (Moraes & Barbosa 1939), houve uma contribuição significativa de Guimarães (1931) e Barbosa (1949) na distinção e interpretação de duas fases deformacionais (dobramentos e soerguimentos) dentro da Série Minas.

Na segunda metade do século XX iniciou-se o estudo sistemático do Quadrilátero Ferrífero, que consiste no sustentáculo para a evolução do conhecimento de sua tectônica. Este estudo foi realizado durante duas décadas (Guild, 1957; Oliveira, 1956; O'Rourke, 1957; Dorr *et al.*, 1957; Barbosa 1961, Gair, 1962; Johnson, 1962; Pomerene, 1964; Reeves, 1966; etc.) e finalmente analisado, integrado, compendiado e publicado pelo USGS e DNPM sob coordenação e autoria de Dorr (1969).

De uma forma geral, Dorr (1969) discriminou três fases de evolução para o Quadrilátero:

- Uma orogênese posterior à deposição da Série Rio das Velhas com intensidade crescente de E para W (pré-Minas);
- Duas orogêneses posteriores à deposição da Série Minas, sendo a segunda com nucleação de sinclinais, soerguimento de terrenos granito-gnássicos e encurtamento crustal com dobramentos e falhamentos de vergência W-NW.

Nas décadas de 1960 e 1970 importantes questionamentos foram feitos aos trabalhos do USGS/DNPM, especialmente, no que se refere à suposta origem alóctone do SGRV (Dorr 1969). Neste contexto, Herz (1961 e 1970) realizou datações radiométricas em vários litotipos pelos métodos K/Ar e Rb/Sr, iniciando um suporte temporal para novas interpretações sobre a evolução do Quadrilátero Ferrífero. Herz (1961) propôs uma idade em torno de 2,89 Ga para a deposição das unidades do SGRV, sugerindo uma intrusão posterior do Granito Engenheiro Corrêa (CMB) e Granito Mamona (Complexo Bonfim) e um rejuvenescimento subsequente do *greenstone* após a deposição do SGM.

A década de 1980 foi marcada por indagações a respeito da evolução do Quadrilátero Ferrífero e adjacências, mediante propostas de modelos polifásicos de deformação que envolvem, principalmente, regimes compressionais (Cordani *et al.* 1980, Ladeira & Viveiros 1984, Oliveira & Vieira 1987, Morrit 1988, Vieira & Oliveira 1988, Alkmim *et al.* 1988, entre outros).

No final deste período, Marshak & Alkmim (1989), em complemento ao modelo bifásico de Alkmim *et al.* (1988), propuseram a inclusão de um regime extensional num modelo polifásico para explicar as principais estruturas do Quadrilátero Ferrífero:

- Fase D1: evento compressivo com vergência para NW (Transamazônico),
- Fase D2: evento compressivo E-W com vergência para N (soerguimento do embasamento / Uruaçuano),
- Fase D3 evento extensional (formação de bacias sedimentares a E e S do Cráton São Francisco / Pós-Uruaçuano),
- Fase D4: evento compressivo N-S com vergência para W (Brasiliano).

Na década de 1990 houve uma notável evolução do conhecimento sobre o Quadrilátero Ferrífero através de levantamentos geológicos e estruturais detalhados, além de datações radiogênicas. Neste contexto, destacam-se os trabalhos de Chemale Jr. *et al.* (1991 e 1994), Souza Filho (1991), Endo & Fonseca (1992), Marshak *et al.* (1992 e 1997), Hippertt (1994), Alkmim *et al.* (1993), Chauvet *et al.* (1994), Corrêa Neto *et al.* (1994), Corrêa Neto & Baltazar (1995), Endo & Carneiro (1996), Endo *et al.*

(1996a e b), Endo (1997), Endo & Machado (1998), Marshak & Alkmim (1998), entre outros.

Contrariando os modelos propostos por Ladeira & Viveiros (1984) e por Marshak & Alkmim (1989), que defendem um evento compressional durante o Transamazônico como principal processo de deformação do Quadrilátero Ferrífero, Chemale Jr. *et al.* (1984 e 1991) destacam dois eventos:

- Evento extensional regional (Transamazônico), com ascensão de blocos e formação de quilhas, fruto de relaxamento da crosta arqueana,
- Evento compressional E-W (Brasiliano) com decréscimo de energia no sentido W, denominado do tipo cinturão de dobramento-cavalgamento.

Marshak *et al.* (1992) sugeriram a formação de domos e quilhas para explicar a estruturação geral do Quadrilátero Ferrífero, resultado da ascensão do embasamento granito-gnássico sob as rochas supracrustais. Segundo os mesmos autores, este evento seria posterior aos empurrões de vergência W e anterior à tectônica brasiliana.

Chauvet *et al.* (1994), favoráveis ao modelo supracitado, propõem uma subdivisão do segundo evento de Chemale Jr. *et al.* (1991 e 1994), incluindo um relaxamento crustal brasileiro, com geração de estruturas extensionais.

Corrêa Neto *et al.* (1994) propõem dois eventos compressivos para caracterizar a evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero. Posteriormente, Corrêa Neto & Baltazar (1995) e Corrêa Neto *et al.* (1997 e 1998) incluem um terceiro evento entre os já propostos pelos autores supracitados. Este evento de idade transamazônica teria uma natureza extensional e seria responsável pelo soerguimento do CMB e pela formação de sinclinais marginais.

Endo (1997), através de um levantamento sistemático das estruturas regionais e estudos geocronológicos (U/Pb de alta precisão), apresentou uma série de modelos de evolução tectono-estrutural para o Quadrilátero Ferrífero e regiões vizinhas, ao longo do Arqueano e Proterozóico.

A Tabela 2.2 apresenta a síntese destes modelos, cujos desenvolvimentos se deram a partir de três megaeventos transpressoriais distintos: Neo-Arqueano, Paleoproterozóico e Neoproterozóico.

Endo & Machado (1998), num apanhado dos trabalhos de Endo (1997) e Endo & Carneiro (1996), propuseram um modelo para a construção tectônica do Quadrilátero Ferrífero, registrada por uma seqüência de superposição de três principais ciclos orogênicos transpressoriais associados a diversos períodos de magmatismo, metamorfismo, deformação e sedimentação. São eles:

- Ciclo Jequié (2,78 a 2,56 Ga/Fácies xisto-verde a anfibolito médio)

- 1º) Evento Rio das Velhas: regime transpressional dúctil e destrai,
- 2º) Evento transpressional sinistral paralelo à direção do anterior,
- 3º) Evento Maquiné: regime transpressional destrai em antigas fraquezas NE-SW, com colocação de plútons.

- Ciclo Transamazônico (2,25 a 1,9 Ga/Fácies xisto-verde baixo a anfibolito)

- 1º) Evento Minas: regime compressional (encurtamento crustal na direção SW) com inversão tectônica
- 2º) Evento Itacolomi: regime compressional (encurtamento e espessamento crustal na direção NW)
- 3º) Evento extensional

- Ciclo Brasileiro (0,6 a 0,5 Ga/Fácies xisto-verde)

- 1º) Evento compressional com cinturões de cavalgamento de vergência para NW na porção S do Quadrilátero Ferrífero e uma tectônica de blocos do embasamento com vergência para W na sua porção N.
- 2º) Evento extensional com soerguimento de blocos do embasamento
- 3º) Evento compressional com vergência N-S e desenvolvimento de dobras com planos de foliação axial NE-SW a E-W.

Tabela 2.2 - Síntese da evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero e adjacências (Endo 1997).

ERA GEOL.	EVENTOS TECTÔNICOS	IDADE (Ma)	PROCESSOS TECTÔNICOS E PRODUTOS PRINCIPAIS	EVENTOS GEODINÂMICOS
NEOPROTEROZOICO	Brasiliano II ECBr2	500 (±)	Clivagens espaçadas E-W e dobras suaves normais E-W; Reativação de descontinuidades; Vetor compressivo regional de S-SE para N-NW.	Orogênese Brasileira II
	Brasiliano I ECBr1	600 (±)	Reativação de descontinuidades; Dobramentos e redobramentos em escala subregional a regional e clivagem / xistosidade associada; Construção e inversão do Sinclinal Moeda; Falhamentos reversos p/ W; Transporte tectônico para W, na região leste do QFe e, para NW, na região S-SSE; Cisalhamentos normais pós-orogênico para leste e clivagem de crenulação associada c/ vergência p/ E.	Orogênese Brasileira I
MESOPROTEROZOICO	Espinhaço	1770 (±) a ?	Falhamentos normais N-S com bloco baixo p/ E; Reativação de descontinuidades; Intrusão de diques de rochas básicas.	Evento Tafrogênico Espinhaço
PALEOPROTEROZOICO	Transamazônico IV – DETr2	2000 (±) a 1900 (±)	Fase extensional pós-orogênica; Falhamentos normais; Intrusão de enxame de veios de quartzo n+1 (ex. Mina da Passagem); Reativação de descontinuidades; Sinclinal Ouro Grosso/Anticlinal do Lenheiro(?); Vetor tectônico p/ SE-SSE.	Orogênese Itacolomi
	Transamazônico III – DCTr2	2059 (±) a 2000 (±)	Deformação com vetor tectônico dirigido p/ N-NW; Inversão da aba SE do Sinclinal do Curral; Reativação de descontinuidades; Falhamentos de empurrão; Congestionamento tectônico Curral/Moeda e Moeda. Bosco; Regime tectônico transpressional sinistral, c/ plano de fluxo N-S.	
	Transamazônico II – DETr1	2101 (±) a 2059 (±)	Fase extensional com vetor tectônico dirigido SE; Formação de megassinclinais interconectadas e domos gnáissicos do Quadrilátero Ferrífero; Deposição do Grupo Itacolomi (Serras do Itacolomi/Ribeiro); Regime tectônico transtensional, dextral, c/ plano de fluxo N-S; Soerguimento de blocos a W-NW do QFe.	Orogênese Minas
	Transamazônico I – DCTr1	2250 (±) a 2100 (±)	Deformação com vetor tectônico dirigido para SW; Metamorfismo de fácies anfibolito; Dobramentos regionais – Sinclinais Vargem do Lima/Santo Antônio; Intrusão de granitos transamazônicos (Alto Maranhão, Ritópolis, Tabuões, Ressaquinha); Reativação de descontinuidades; Regime tectônico transpressional, dextral c/ plano de fluxo N-S; Possível rotação de blocos; Barbacena/O. Branco.	
ARQUEANO	Rio das Velhas III – Erv3	2612 (±) a 2555 (±)	<i>Deposição do Supergrupo Minas</i> Deformação dúctil-rúptil, transcorrente dextral; Intrusão dos granitos Salto do Paraopeba e Itabirito; Regime de deformação transpressional dextral.	Orogênese Maquiné
	Rio das Velhas II – Erv2	2658 (±) a 2612 (±)	Deformação dúctil, transcorrente sinistral; Foliação milonítica N-S, vertical no SGRV; Fraturamento crustal de direções NW-SE e E-W (anti-Riedel dextral); Intrusão de diques máficos NW-SE; Deposição do Grupo Maquiné; Regime tectônico transpressional sinistral.	Evento de Cisalhamento e Fraturamento Crustal
	Rio das Velhas I – Erv1	2780 (±) a 2682 (±)	Deformação dúctil, transcorrente dextral, N-S; Foliação milonítica vertical no SGRV; Foliação milonítica de borda no CMBaço; Metamorfismo de fácies anfibolito; Fraturamento crustal NE-SW; Intrusão do Tonalito Samambaia, Anfibolito Candeias e Granito Brumadinho; Formação de pontos triplícies de foliação nos quadrantes NW e SE do CMBaço; Regime tectônico transpressional dextral.	Orogênese R. das Velhas
	Pré – Rio das Velhas	2920 (±)	Deformação dúctil transcorrente sinistral N-S; Foliação gnáissica e milonítica vertical no Gnaiss Alto Flores – Complexo metamórfico Bonfim; Plano de fluxo possivelmente N-S (Evento Bonfim).	?

Alkmim & Marshak (1998) reconheceram dois estágios da orogênese transamazônica no Quadrilátero Ferrífero, representantes paleoproterozóicos de eventos de colisão e colapso de blocos continentais. O primeiro, consiste de dobramentos e empurrões de vergência NW que afetaram as rochas supracrustais. Este estágio teria ocorrido logo após 2,125 Ga, fruto do fechamento de uma bacia de margem passiva originada ao longo das margens de uma massa continental pré-existente de 2,5 Ga. O segundo estágio foi originado por um colapso das rochas supracrustais (2,095 Ga), definindo a estruturação de domos e quilhas do Quadrilátero Ferrífero.

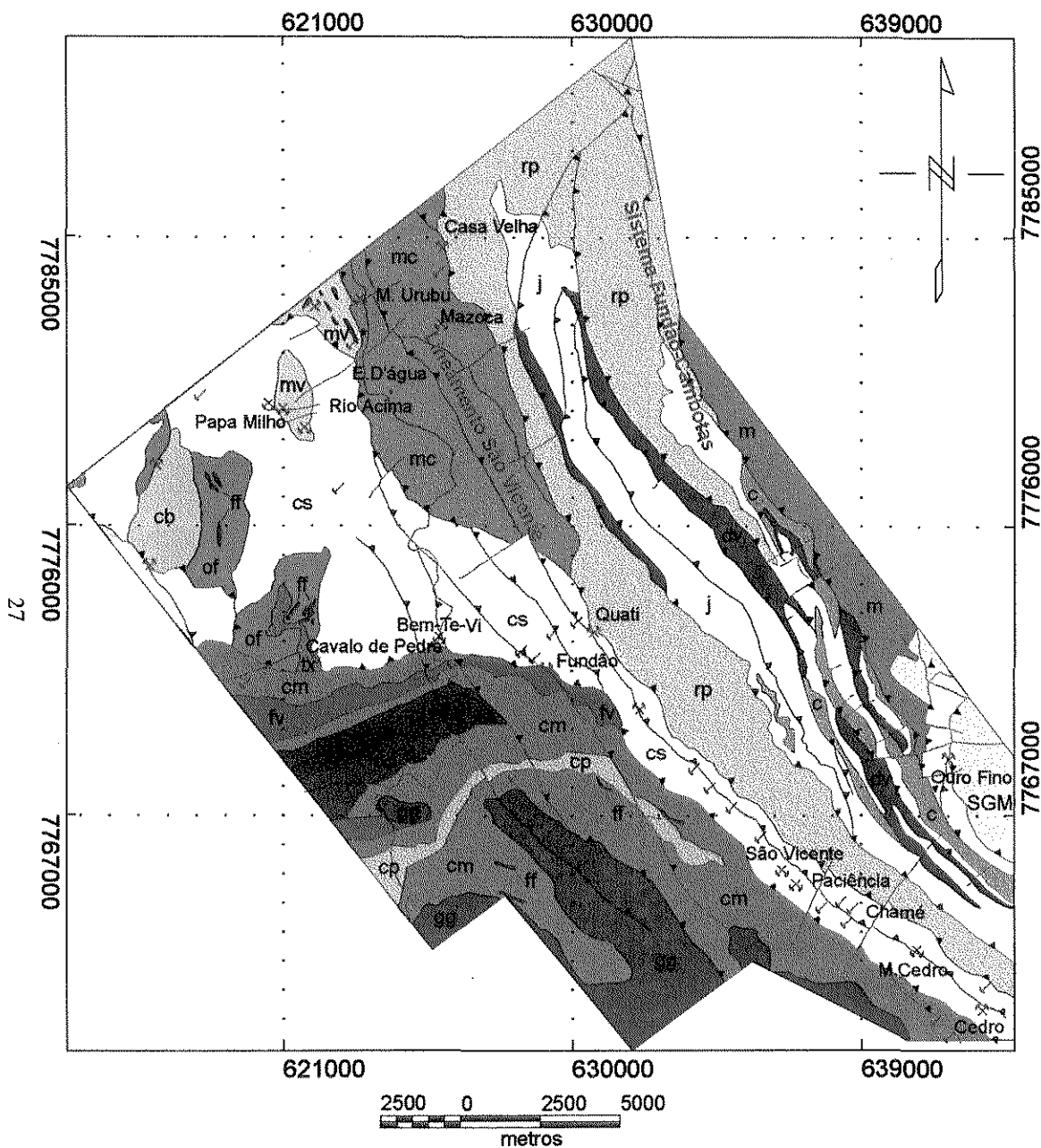
2.4 - ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO

Existem poucas contribuições ao conhecimento geológico evolutivo da área investigada. O'Rourke (1957) realizou o primeiro mapeamento de detalhe (escala 1:25000) nas folhas Gandarela e Rio de Pedras. Posteriormente, seu trabalho foi integrado à revisão estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero publicada por Dorr (1969).

Féboli & Signorelli (1993 a e b), Signorelli *et al.* (1993) e Silva (1993) mapearam as folhas correspondentes à área de investigação em escala 1:25000, como parte do PRV. A Figura 2.4 apresenta uma compilação destes mapeamentos para a porção central do Quadrilátero Ferrífero, com os principais aspectos geológico-estruturais.

2.4.1 - TERRENOS GRANITO-GNÁSSICOS (TGGs)

Os TGGs estão representados, na presente área, pelo CMB. Através do mapeamento da quadrícula Rio de Pedras, O'Rourke (1957) descreveu uma transição entre o GNL e o granito gnaisse bandado do CMB, propondo sua origem a partir da granitização do GNL. Herz (1962) Propôs uma origem ígnea, justificada pela falta de uma fonte quartzo-feldspática suficiente nas unidades metassedimentares ricas em Fé, Mg e K do GNL.



Legenda

- SUPER GRUPO MINAS (SGM)
- SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS

Grupo Maquiné

Formação Casa Forte

- Unid. Capanema (c)
- Unid. Jaquara (j)
- Unid. Chica Dona (d): Facies Córrego Viana (v)

Formação Palmital

- Unid. Andaimas (a)
- Unid. Rio das Pedras (rp)

Grupo Nova Lima

- Unid. Córrego do Sítio (cs)
- Unid. Mindá (m)
- Unid. Pau D'Óleo (po)
- Unid. Córrego da Paina (cp)
- Unid. Fazenda Velha (fv)
- Unid. Catarina Mendes (cm)
- Unid. Mestre Caetano (mc)
- Unid. Morro Vermelho (mv)
- Unid. Córrego dos Boiadeiros (cb)
- Unid. Ouro Fino (of)
- COMPLEXO METAMÓRFICO BAÇÃO (gg)

Herz (1970) realizou estudos químicos, petrogenético e radiométricos nas rochas gnássicas e ígneas do Quadrilátero Ferrífero, dividindo-as em 4 grupos. Neste mapeamento, o CMB foi subdividido em dois grupos:

- O primeiro composto por um núcleo ígneo mais antigo (2,7 Ga) denominado Granodiorito Engenheiro Corrêa;
- O segundo constituído por um gnaiss bandado originado por fusão parcial das unidades metassedimentares do GNL, com idades semelhantes ao anterior, assim como mais jovens (1,35 Ga), denominado Granito Gnaiss Itabirito.

Ainda conforme Herz (1970), o Granito Gnaiss Itabirito grada para composições granodiorítica, migmatíticas e graníticas, além de apresentar uma foliação bem definida. O Granodiorito Engenheiro Corrêa é fracamente foliado e possui uma mineralogia semelhante ao anterior, porém, menos diferenciada. O mesmo autor registra a presença de magnetita nesta unidade.

Ricomini & Amaral (1980), analisando imagens de sensoriamento remoto, reconheceram feições circulares internas ao CMB entre elas, uma estrutura dômica correspondente ao Granodiorito Engenheiro Corrêa (Herz 1970).

O CMB caracteriza-se pela presença de gnaisses polideformados, bandados de composição tonalítica-trondhjemitica a granodiorítica (Herz 1970 e Gomes 1986). São também registradas intrusões graníticas e granodioríticas no gnaiss bandado (Ricomini 1982), algumas apresentando cisalhamento (Guimarães *et al.* 1966, Herz 1970, Ricomini & Amaral 1976 e Endo 1997). Próximo às bordas ocorrem auréolas de metamorfismo de contato (Herz 1970).

Machado *et al.* (1989) determinaram idades transamazônicas (2,022 a 2,059 Ga) para os processos metamórficos e de fusão parcial que atuaram na região SE do CMB. Datações Pb/Pb realizadas por Endo (1997) fornecem idades de 2,682 $\pm$ 43 Ga para algumas intrusões, registrando os últimos eventos magmáticos do Arqueano neste complexo. Machado *et al.* (1989) registram injeções pegmatíticas com direção paralela ao contato com as rochas supracrustais e relacionadas à orogênese Transamazônica.

O formato do complexo é dômico, perfazendo um contato tectônico com as unidades do SGRV, caracterizado por rochas miloníticas com mergulhos variáveis de

moderado a vertical, apesar de, no seu interior, predominarem mergulhos elevados (Endo 1997). Existem estudos em andamento (Issamu Endo, informação verbal), que apontam a existência de duas suítes granitóides dentro do CMB. Uma das suítes apresenta-se foliada, com idade arqueana e está posionada na borda SE do domo disposta ao longo de um “corredor” NW-SE. A outra suíte de granitóides não apresenta foliação nem idade determinada.

2.4.2 - SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS (SGRV)

•Grupo Nova Lima

O'Rourke (1957), mapeando as folhas de Gandarela e Rio de Pedras, dividiu as unidades existentes em duas seqüências. A mais antiga foi caracterizada por filitos cloríticos e quartzitos, gradando de biotita-xisto a gnaiss. Estas rochas foram interpretadas como resto do embasamento granítico de idade pré-Maquiné, conforme definido em outras partes do Quadrilátero Ferrífero. A seqüência mais jovem era composta de rochas metassedimentares variadas, incluindo quartzitos, ardósias, ffs e dolomitos. Esta seqüência foi subdividida nos grupos Maquiné, Serra Geral e Piracicaba, cada uma destas limitada no topo e na base por inconformidades.

Conforme Pinto *et al.* (1996), a base do GNL é caracterizada por uma associação metavulcânica-plutônica de composição tholeítica a komatiítica (unidades Ouro Fino e Córrego dos Boiadeiros), típica de águas profundas. Posteriormente, observa-se uma associação metavulcano-sedimentar química (Unidade Morro Vermelho) e outra metassedimentar pelítica (Unidade Santa Quitéria), seguidas por rochas metavulcano-sedimentares clásticas (Ribeirão Vermelho, Mestre Caetano e Santa Quitéria). O topo desta seqüência é composto de uma cobertura metassedimentar clástica marinha originada por fontes diversas (unidades Catarina Mendes, Córrego do Sítio, Pau d'Óleo, Mindá e Fazenda Velha).

Unidade Ouro Fino (of)

Esta unidade está representada por rochas metavulcânicas básicas e ultrabásicas, com intercalações subordinadas de metavulcânicas ácidas, ffb's, aglomerados vulcânicos, lapilli-tufos, tufos, tufitos, xistos grafitosos e metacherts. A maioria destas rochas foi submetida a um intenso processo de carbonatação. Observa-se a ocorrência localizada de camadas espessas de ffb's de fácies carbonato. Seu registro se dá na porção oeste da área, apresentando contatos tectônicos com a Unidade Córrego do Sítio e transicional com a Unidade Córrego dos Boiadeiros.

Unidade Córrego dos Boiadeiros (cb)

São rochas intrusivas, representadas por uma seqüência máfica/ultramáfica metamorfizada e de filiação komatiítica, com predominância de serpentinitos, esteatitos e metagabros. Ocorrem na porção W da área e apresentam contatos tectônicos com as demais litologias.

Unidade Morro Vermelho (mv)

Esta unidade aflora restritamente na porção NW da área, estendendo-se além dos limites da mesma. São intercalações centimétricas a métricas de formação ferrífera bandada, rochas metavulcânicas básicas e intermediárias, xistos grafitosos/ carbonosos e metachert, constituídas de níveis de quartzo e carbonato e de magnetita. Estas intercalações mostram indícios de alteração hidrotermal intensa, destacando-se níveis de clorita e quartzo nas partes mais preservadas das rochas. Suas relações de contato com a Unidade Córrego do Sítio não são definidas.

Unidade Mestre Caetano (mc)

A unidade Mestre Caetano ocorre na porção NW da área e representa uma transição de ambiente vulcanogênico para sedimentar (unidades Córrego do Sítio e Mindá), sem um contato definido. É composta de metagrauvacas vulcanogênicas, intercaladas com níveis subordinados de metatufos e metapelitos, além de camadas restritas de formação ferrífera quartzosa, xisto carbonático vulcanogênico (Formação Lapa Seca), metaconglomerado e metandesito. A rocha carbonática, apesar de muito

alterada, parece evidenciar, em campo, um estágio avançado de hidrotermalismo. Os metatufos registram, localmente, intensos processos de alteração hidrotermal, com cristalização secundária de clorita, carbonato, quartzo, turmalina e sulfeto.

Unidade Catarina Mendes (cm)

A Unidade Catarina Mendes ocorre na parte sul da área e, de uma forma geral, é composta por metagrauvacas homogêneas compostas por quartzo, feldspato, biotita, clorita e, subordinadamente, granada e anfibólio. Estes litotipos são metamorfizados na fácies anfibolito, com retrometamorfismo na fácies xisto verde. Associam-se níveis pouco expressivos de formação ferrífera pouco magnética. Seu conjunto representa uma seqüência turbidítica proximal em relação à fonte, sedimentada em ambiente marinho. Seus contatos, principalmente com a Unidade Córrego do Sítio e com o CMB, são através de falhas de empurrão.

Unidade Fazenda Velha (fv)

Estas rochas ocorrem na porção central e SW da área (parte centro-norte da folha Itabirito e NW da folha Rio de Pedras). São ritmitos predominantemente arenosos, caracterizados, como metagrauvaca feldspática, metarenito feldspático, metarenito lítico e finos níveis de metargilito carbonoso subordinado. Féboli & Signorelli (1993b) sugerem uma deposição em ambiente marinho por correntes de turbidez próxima à fonte. Os contatos com as unidades Catarina Mendes e Córrego do Sítio são transicional e tectônico, respectivamente.

Unidade Córrego da Paina (cp)

Aflorando na porção centro-sul da área apresenta um contato transicional com a Unidade Catarina Mendes. Consiste de uma seqüência rítmica predominantemente argilosa caracterizada por metargilito, metassiltito, metassiltito arenoso, metarenito impuro e metagrauvaca, intercalada com lâminas de xisto carbonoso e níveis pouco expressivos de formação ferrífera fracamente magnética. Esta unidade representa uma seqüência argilosa formada em ambiente marinho, com deposição por correntes de turbidez distal à fonte. Seus contatos com as demais unidades são tectônicos.

Unidade Pau D'Óleo (po)

Esta unidade ocorre na porção SW da área, evidenciando contatos transicional com a Unidade Catarina Mendes e tectônico com a Unidade Andaimés (GM). Representa uma seqüência arenosa (metassiltito, metarenito e metagrauvaca) preponderantemente carbonática de provável natureza marinha rasa, formada em fácies de planícies de maré (Féboli & Signorelli 1993).

Unidade Mindá (m)

Ocorre na porção E/NE da área, expondo contatos tectônicos com as demais unidades presentes. Além dos limites da área de estudo (norte da Folha Gandarela) estas rochas exibem um contato gradacional com os litotipos da Unidade Córrego do Sítio. Estão representados por seqüências rítmicas formadas por metagrauvacas, metapsamitos e metapelitos.

Unidade Córrego do Sítio (cs)

Estas rochas são formadas por uma alternância de metapelitos bandados com metapsamitos e xisto carbonoso, com uma mineralogia constituída, basicamente, por clorita, mica branca e quartzo. Ainda ocorrem raros níveis de formação ferrífera fracamente magnética e bandas quartzosas e micáceas, geralmente distribuídos ao longo da Falha Bem-Te-Vi. Vale salientar a presença de alteração hidrotermal ao longo do Lineamento São Vicente - LSV, registrada por zonas de intensa cloritização, sericitização, silicificação e carbonatação.

Os litotipos desta unidade estão metamorfizados na fácies xisto verde e estendem-se por toda a área alinhados na direção SE-NW, ao longo do LSV. Na parte SE são caracterizados em superfície por uma faixa estreita de 860 metros de espessura média, que se amplia na porção NW para até 4800 metros de espessura. Além disso, afloram numa pequena faixa na porção E/SE da região, contornando as rochas do SGM. Os contatos com as demais litologias presentes são tectônicos, através de falha de empurrão.

•Grupo Maquiné

I. Formação Palmital (Fácies litorânea)

Unidade Rio de Pedras (rp)

A Unidade Rio de Pedras ocupa três faixas que se estendem na direção NW-SE e cortam toda a área de estudo, desde a sua fração SE até seu extremo NW (NW da Folha Rio Acima). Seus contatos com as demais unidades são tectônicos, por falha de empurrão. A interpretação desta unidade não está clara, observando-se diferentes critérios de descrição e agrupamento dos litotipos presentes para as folhas mapeadas. De uma forma geral, é constituída de micaxistos, quartzo-mica xistos, com intercalações de quartzitos micáceos finos, localmente com cloritóide.

Unidade Andaimes (a)

A Unidade Andaimes ocorre a SW da região numa faixa estreita de direção E/NE, envolvida pela Unidade Pau D'Óleo, num contato transicional. Trata-se de quartzitos micáceos com fragmentos finos a médios de quartzo e feldspato vulcanogênico intercalados com quartzitos microconglomeráticos e metaconglomerados polimíticos

II. Formação Casa Forte (Fácies fluvial)

Unidade Chica Dona (c)

A Unidade Chica Dona é representada por bancos de quartzito fino com intercalações de metaconglomerado polimítico, subdivididos nas fácies Córrego do Viana e Córrego da Cidreira, esta última fora dos limites da região estudada. A Fácies Córrego do Viana ocorre nas porções NE e SE da área em estreitas faixas, alongadas segundo a direção NW-SE. Constitui-se de intercalações com espessuras variadas, compostas por quartzitos finos, predominantes, e metaconglomerados polimíticos. Estes últimos são formados por seixos de ffb, metachert, xisto carbonoso e de veios de

quartzo, além de uma restrita matriz quartzo-sericítica, ocasionalmente ferruginosa. Seus contatos com as demais unidades são tectônicos.

Unidade Jaguará (j)

Dispondo-se ao longo da direção NW-SE, está representada por uma faixa de até 2000 metros de espessura que acompanha geograficamente os litotipos da Unidade Rio de Pedras, de NW a SE da área. De um modo geral, verificam-se contatos tectônicos desta com as demais unidades. Trata-se de intercalações de quartzito sericítico grosso e de finas e restritas lentes de metaconglomerado polimítico, reconhecidas como parte do domínio sedimentar continental da Formação Casa Forte (Signorelli *et al.* 1993).

Unidade Capanema (cc)

A Unidade Capanema ocorre nas partes central e SE da área, representada por estreitas faixas de direção NW-SE, perfazendo limites transicionais com unidades do GM e tectônicos com aquelas do GNL. Esta unidade destaca-se pela presença de metassedimentos mais finos, dispostos em faixas estreitas que vão desde uma dezena até 460 metros de espessura. São sericita xistos, sericita-quartzo xistos e quartzitos sericíticos finos associados a um ambiente não marinho de fácies leque aluvial e fluvial do tipo *braided* (Signorelli *et al.* 1993).

Maiores detalhes sobre a litoestratigrafia resultante do PRV encontram-se nos trabalhos de Pinto *et al.* (1996) e CPRM (1996), assim como nos textos explicativos publicados por Féboli & Signorelli (1993a e b), Signorelli *et al.* (1993) e Silva (1993).

2.4.3 - SUPERGRUPO MINAS (SGM)

O SGM é uma seqüência Paleoproterozóica do tipo margem continental que ocorre de forma discordante sobre as unidades do SGRV e TGGs do Quadrilátero Ferrífero.

Dorr (1969) dividiu este supergrupo em três unidades: uma basal formada por metassedimentos essencialmente clásticos (Grupos Tamanduá e Caraça), uma

intermediária constituída por metassedimentos químicos (Grupo Itabira) e uma superior com metapelitos e metatufos (Grupo Piracicaba). O Grupo Itabira aflora no canto E da área investigada e caracteriza-se por extensas ffbbs do tipo Lago Superior.

2.5 - PRINCIPAIS FEIÇÕES TECTÔNICAS DA ÁREA DE ESTUDO

Arqueamento Rio das Velhas

O Arqueamento Rio das Velhas constitui uma feição fundamental na estruturação do Quadrilátero Ferrífero, balizado pelos complexos granito-gnássicos, além de várias estruturas sinformais a ele associadas (Figura 1.1). Este soerguimento engloba toda a área de estudo, estendendo-se além de seus limites NW e SE por, no mínimo, uma centena de quilômetros. Seu corpo principal possui uma direção geral NW-SE (a SE e NE do CMB) e, de acordo com Dorr (1969), inflete para NE nas proximidades da cidade de Nova Lima. Segundo este autor, sua arquitetura central é a chave para o desenvolvimento do Quadrilátero Ferrífero.

De idade arqueana, esta estruturação apresenta uma evolução tectônica complexa, com reativações orogênicas ao longo de todo o Proterozóico. Controladas pelo *trend* principal desta estruturação, estão registradas: a Zona de Cisalhamento São Vicente - ZCSV, o Sinclinal Vargem do Lima - SVL e a Falha do Fundão.

Sinclinal Vargem do Lima

O SVL, presente na porção NNE da área, possui um eixo de direção geral NW-SE, com vergência para SW e flanco NE invertido, além de lineações minerais com orientação WNW-ESE. Esta estrutura é limitada por falhamentos de empurrão a NE (Sistema Fundão Cambotas) e a NW (ZCSV) (Figura 2.4).

Sua evolução tectônica está relacionada a um evento de natureza compressional transamazônico, onde se desenvolveram várias megadobras associadas a falhamentos de empurrão (ex: Sistema Fundão-Cambotas e LSV) que delinearam a arquitetura atual do Quadrilátero Ferrífero (Endo, 1997). Chemale Jr. *et al.* (1991a e b) e Marshak *et al.* (1992) reconhecem eventos extensivos (vergência p/ WNW-ESE) e compressivos

(vergência p/ NW), respectivamente, para a gênese desta megaestrutura. Posteriormente, teria ocorrido um evento compressional, associado à orogênese brasileira, caracterizado por um sistema de estruturas e cavalgamentos associados, gerado sob um campo tensorial σ_1 de direção aproximada E-W.

Zona de Cisalhamento São Vicente

Com direção NW-SE, corta toda a extensão da área e, segundo Moraes e Barbosa (1939), O'Rourke (1957) e Signorelli *et al.* (1993), destaca-se pela presença de quase uma centena de minas de ouro em atividade e outras paralisadas ou abandonadas, ao longo de todo o seu *trend* principal, denominado LSV (Figura 2.4). Este lineamento caracteriza-se, ao longo de toda a sua estruturação, por um enxame de lentes e *boudins* de quartzo branco e cinzento, controlados por uma lineação de estiramento em torno de 115/20. Segundo Baltazar *et al.* (1995), a ZCSV possui cinemática direcional, sinistral, representando uma importante descontinuidade crustal que acompanha a direção geral do Arqueamento Rio das Velhas.

A SE da área (Folha Rio de Pedras), o LSV está registrado ao longo da Unidade Córrego do Sítio (direção NW-SE), dividindo-a em duas porções ao longo de sua direção principal. Da mesma forma, a NW da área, o lineamento passa a cortar a Unidade Mestre Caetano.

Complexo Metamórfico Bação

Em virtude de sua complexidade evolutiva, estes litotipos serão discutidos também como um domínio estrutural. Endo (1997) sugere que os gnaisses do CMB são fruto de uma possível extensão do evento deformacional mais antigo do Quadrilátero Ferrífero, onde este corpo dômico de comportamento plástico teria sua primeira fase de deslocamento ascensional durante a inversão da Bacia Rio das Velhas. Desta forma, o "Corpo Bação", um suposto núcleo tectônico rígido, experimentou uma deformação anisotrópica, onde seus domínios NE e SE sofreram encurtamento crustal e seus domínios adjacentes sofreram processos extensionais. Apesar de não haver critérios geocronológicos seguros, as estruturas presentes registram um cisalhamento direcional

de caráter sinistral, correlacionável ao evento Neo-Arqueano (2,92Ga) registrado no Complexo Metamórfico Bonfim, através dos trabalhos de Carneiro (1992).

Posteriormente, magmatismos intrusivos cálcio-alcálicos e tholeítico teriam ocorrido ainda no Arqueano (Evento Rio das Velhas/2,78 a 2,555 Ga), representado no CMB pelos granitos São Gonçalo do Bação (2,712 a 2,682 Ga) e Itabirito (2,612 a 2,555 Ga) (Endo 1997). Estas intrusões estariam relacionadas ao intenso fraturamento da antiga crosta siálica e das unidades do SGRV, que viria a consolidar a plataforma arqueana.

No Transamazônico, ocorreram eventos distensivos que propiciaram o soerguimento do CMB, juntamente com a formação de megassinclinais, conforme propôs Chemale Jr. *et al.* (1991a). Além disso, Machado *et al.* (1992) descreveram intrusões de pegmatitos na borda SE deste domo (além dos limites desta área) promovidas em eventos compressionais posteriores. Esta colocação de corpos ígneos é interpretada por Endo (1997) como um ajuste de blocos do embasamento por mecanismo de cunhas tectônicas e uma conseqüente nucleação de sítios distensivos. Nos eventos do Brasiliano, o CMB comportou-se como um bloco rígido, deslocando-se para W e induzindo a nucleação de falhas inversas ao seu redor com movimento homônimo.

Alkmim & Marshak (1998) reinterpretaram as propostas de Barbosa (1968), Chemale (1994), Hippert (1994), Marshak *et al.* (1997), entre outros a respeito dos mecanismos de colocação do embasamento gnássico nas unidades supracrustais do Quadrilátero Ferrífero. Na reinterpretação, tais autores descrevem o CMB como parte de uma arquitetura de domos e quilhas iniciada após o desenvolvimento das estruturas de vergência para NW (evento compressional transamazônico) e anteriores àquelas de vergência para W (evento contracional brasileiro). O ápice da ascensão dos domos ocorre na etapa final do Transamazônico, durante o colapso extensional dos orógenos colisionais.

Lineamento Fundão

O lineamento Fundão faz parte do Sistema Fundão-Cambotas (Chemale Jr. *et al.* 1991a), também denominado Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas (Endo &

Fonseca, 1992) e encontra-se estruturado numa direção geral N-S apenas na porção nordeste desta área, materializando o contato do Supergrupo Rio das Velhas com o SGM. Segundo Chemale Jr. *et al.* (1991a) e Silva (1993), esta megafalha representa possíveis fraquezas crustais pré-Minas reativadas de modo sinistral durante o Brasileiro. Conforme Endo & Fonseca (1992), ela constitui uma zona de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil, de geometria e evolução cinemática complexa e alojada entre as unidades dos SGRV e SGM. Isto se deve à superposição de eventos deformacionais e, também, à presença de blocos rígidos pré-Minas (Arqueamento Rio das Velhas, CMB, entre outros) (Figuras 2.2 e 2.4).

2.6 - CARACTERÍSTICAS DAS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS DA PORÇÃO CENTRAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero consiste numa das principais províncias auríferas do tipo *BIF-hosted* no mundo, onde a maioria dos depósitos primários encontra-se associada às unidades do GNL, base do SGRV. Esta mineralização possui uma gênese de complexo entendimento, iniciada no Arqueano por uma interação de processos sedimentares e vulcano-exalativos em *greenstone belts* que concentraram o ouro em corpos sulfetados (pirita, pirrotita, arsenopirita, entre outras assembléias) e veios de quartzo nas ffb's e metacherts, além das rochas metavulcânicas (máficas e félsicas) e metassedimentares (Vieira 1991 e Ribeiro Rodrigues 1997). A idade da mineralização ainda não é totalmente conhecida e os estudos sobre suas relações com a evolução tectônica da região estão em fase inicial (Corrêa Neto *et al.* 1998, Endo 1997).

As principais ocorrências da porção central do Quadrilátero Ferrífero associam-se à ZCSV de direção N50°W, distribuídas ao longo de seu *trend* principal (LSV), apresentando comprimentos que variam de 100 a 1200 metros e uma extensão lateral média de 100 metros. Tais depósitos auríferos foram descobertos e lavrados durante o século XVII e XIX e, atualmente, correspondem a uma centena de escavações superficiais, a maioria abandonadas ou desativadas. Geralmente, os corpos de minério ocorrem nas rochas metassedimentares, hospedados nos sulfetos disseminados em veios de quartzo, envoltos por zonas de alteração hidrotermal. Além desses, existem

outros depósitos na porção W da área, distribuídos em zonas sulfetadas associadas a ffbs em rochas metavulcânicas máficas e félsicas. Em toda a área as zonas sulfetadas apresentam controle estrutural e a alteração hidrotermal superpõe-se às paragêneses dos minérios (Lobato *et al.* 1998). (Figura 2.4).

Conforme Moraes & Barbosa (1939), O'Rourke (1957) e Signorelli *et al.* (1993), estão registradas as mineralizações de Baú, Gorduras, Boa Vista, Marzagão, Califórnia, Ouvidor, Chácara, Engenho de Cima, Paciência, Passa Tempo, São Vicente e Monges, Mina do Urubu, Engenho D'Água, Fazenda Papa Milho, Mina do Cedro, Quati, Morro das Almas, Escavação do Viana, Chamé, algumas sem cartografia exata. Além dessas, existe uma dezena de escavações não registradas na literatura científica. Os teores em ouro nessas minerações chegam a 20g/t, porém na média, ficam em torno de 2g/t. Destacam-se as minas Urubu (teor médio de ouro: 7,67 g/t) e Fazenda Papa Milho (teor médio de ouro: 5,26 g/t), ambas em atividade. A seguir, serão apresentados os dados das principais ocorrências.

Mina Urubu (coordenadas UTM: 7783220; 624090)

A mineralização ocorre nas camadas de ffbs de rochas metassedimentares e em filitos carbonosos, na direção geral 160° e com dimensões entre 17 e 126m² (Feboli & Signorelli 1993). O minério encontra-se disseminado em massas quartzo-carbonáticas com pirita associada. Segundo Oliveira (1984), a reserva total de minério é de 702551 t, com teor médio de 7,67 g/t de ouro.

Mina Fazenda Papa Milho (coordenadas UTM: 7779920; 621070)

O ouro está associado às ffbs intercaladas nos metandesitos da Unidade Morro Vermelho. As rochas apresentam *box-works*^{2,3}, além de pirita maciça a disseminada e pirrotita frescas na zona de minério, com níveis freqüentes de clorita ou, mais raramente, de metachert. Os corpos de minério estão orientados segundo a direção N60-80E/30-35SE. A hipótese para a gênese da mineralização é de um processo de

^{2,3} Rede de lâminas de limonita ou outros minerais depositada em cavidades ao longo de planos de fraturas dos quais o material interveniente foi dissolvido por processos associados à percolação d'água. *Box works* são comuns em zonas de minérios sulfetados oxidados.

alteração hidrotermal em zona de cisalhamento (cloritização, carbonatação, silicificação com aporte de sulfetos (Féboli & Signorelli 1993)). Conforme Souza (1987), a reserva total é da ordem de 30900 t de minério, com teor médio de 5,26 g/t.

Lavras do Morro São Vicente (coordenadas UTM: 7765665; 637973)

São galerias abandonadas dispostas ao longo do lineamento homônimo. Estas lavras encontram-se na Folha Rio de Pedras e denominam-se: Passa Tempo, Morro das Almas, Mina da Paciência, Engenho de Cima, Chácara, Marzagão, Boa Vista e Baú. Muitas destas escavações não possuem registros exatos de suas localizações. Moraes & Barbosa (1939) relacionam os corpos de minérios a massas de quartzo presentes em filito sericítico claro.

Estes depósitos encontram-se abandonados ao longo do LSV, a maioria dos minérios ocorrentes está associada a veios de quartzo e relacionados aos processos de alteração hidrotermal, como: carbonatação, sericitização, silicificação e sulfetação (Signorelli et al. 1993). A mineralização é registrada ao longo de toda a zona de cisalhamento dúctil por um enxame de lentes e boudins de quartzo branco e cinzento, controlada por uma lineação em torno de 115/20. Segundo Vieira (1988), os veios de quartzo auríferos ocorrem na porção central das zonas de alteração hidrotermal, dispostos em estreitas zonas de sulfetação. A Figura 2.5 apresenta um trecho do LSV destacado pelas cavas em forma de “V” ao longo de sua extensão NW-SE, parcialmente cobertas pela vegetação. A Figura 2.6 mostra um detalhe de uma das cavas. A Tabela 2.3 apresenta dados complementares sobre as ocorrências existentes, obtidos pelo Grupo Mineração Morro Velho e nos trabalhos de campo e de laboratório realizados neste projeto.

Outras ocorrências:

Existem trabalhos de pesquisa em mineralizações descontínuas de ouro e urânio subordinado nos metaconglomerados do GM (Formação Moeda) sem valor econômico. Por fim, algumas pesquisas foram realizadas em aluviões do Rio de Pedras, com teores determinados em 5,4 g/t em ouro (Signorelli et al. 1993).



Figura 2.5 - Cavas ao longo do Lineamento São Vicente.



Figura 2.6 - Detalhe de uma das cavas do Lineamento São Vicente.

Ocorrências de ouro na Porção Central do Quadrilátero Ferrífero											
Mina/ocorrência	Coordenada N	Coordenada E	Encaixantes	Hospedeira	Minério	Plunge	Min. Magnét.	Grafita	Extensão Lateral	Anomalia de K	Observações
Bahú	7770520	632210	Metassedimentos	Sericita filito	Qz com Py disseminada	S60°-75°E/20°	Não	Não	600 m	Sim	Alteração hidrotermal
Bem-te-vi	7772620	626300	Metassedimentos	Quartzitos	Veio de sulfeto (Py, Aspy) maciço	(?)	Não	Não	(?)	-	Falhamento (?)
Casa Velha	7784750	626000	Metarenito e metapelitos	Sericita fto e BIF carb.	Sulfeto (Py) maciço e Qz	N90°E/40°	Não	Não	100 m	-	Alteração hidrotermal
Cavalo de Pedra	7771990	622200	Metaultramáficas	Serpentinito carbonatado	Massas de Qz com rara Py	(?)	Sim	Não	250 m	-	Alteração hidrotermal
Chamé	7764310	639080	Metassedimentos	Sericita filito	Qz com Py disseminada	S60°-75°E/20°	Não	Não	500 m	Sim	Alteração hidrotermal
Eng. D'Água	7764310	626100	Metavulcânica ácida	Rocha silicificada	Py disseminada	N80°E/40°	Não	Não	200 m	Não	Alteração hidrotermal
Esperança	7782900	622000	Metandesitos	BIF carbonática	PY maciça a disseminada	N60°E/35°	Não	Sim	250 m	Não	Alteração hidrotermal
Faz. Cedro	7763220	619880	Metassedimentos	Sericita filito	Massas de Qz com Py disseminada	S60°-75°E/20°	Não	Não	250 m	-	Alteração hidrotermal
Fundão	7771700	629220	Metassedimentos	Sericita filito	Massas de Qz com Py disseminada	N86°E/30°	Não	Não	200 m	-	Alteração hidrotermal
Mazoca	7782390	626380	Metassedimentos	Sericita fto e BIF carb.	Qz com Py disseminada	N80°E/40°	Não	Sim	200 m	-	Alteração hidrotermal
Monges	7761340	642850	Metassedimentos	Sericita filito	Massas de Qz com Py disseminada	S60°-75°E/20°	Não	Não	500 m	-	Alteração hidrotermal
Ouro Fino	7769030	641770	Quartzitos	Conglomerados	ouro livre	(?)	Não	Não	200 m	-	Deposição e falhamento - Fm. Moeda
Paciência	7765700	637100	Metassedimentos	Sericita filito	Qz com Py disseminada	S70°E/16°	Não	Não	1200 m	Sim	Alteração hidrotermal
Papa Miho	7779920	621070	Metandesitos	BIF carbonática	Py maciça a disseminada	N60°E/35°	Não	Sim	200 m	Não	Alteração hidrotermal
Urubu	7783220	624090	Metassedimentos	BIF e filito carbonoso	Massas de Qz com Py	N86°E/40°	Não	Sim	300 m	-	Alteração hidrotermal
Quati	7772800	630700	Metassedimentos	sericita filito	Massas de Qz com Py disseminada	S60°-75°E/20°	Não	Não	250 m	-	Alteração hidrotermal

Tabela 2.3 – Ocorrências de ouro na Porção Central do Quadrilátero Ferrífero

CAPÍTULO 3 - GEOFÍSICA APLICADA À EXPLORAÇÃO DE OURO EM TERRENOS DO TIPO *GREENSTONE-BELT*: CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS E NÍVEL ATUAL DO CONHECIMENTO

3.1 - INTRODUÇÃO

O aumento das atividades de exploração mundial de ouro na década de 1990 incentivou o aperfeiçoamento de várias técnicas de prospecção geofísica como complemento ao conhecimento da geoquímica deste metal. Essas técnicas sofisticadas permitem que levantamentos de alta resolução sejam realizados a um custo relativamente baixo, tanto pela iniciativa privada para reduzir o custo da exploração, como pelos governos para encorajar o desenvolvimento de investimentos e viabilizar o manejo sustentável de recursos naturais.

Em função do potencial aurífero de vários distritos minerais do Brasil, o governo brasileiro promoveu nessa década alguns programas de fomento à definição das potencialidades geológicas e econômicas para ouro no país, na tentativa de melhorar a posição de sétimo lugar no ranking mundial apresentada em 1991 (2157 toneladas - 3,69 % da produção mundial), tão distante da liderança conquistada durante o século XVII (CPRM 1995). Nesse sentido, os dados aerogeofísicos do PRV (Brasil 1993) representaram a possibilidade do redescobrimento do potencial da ferramenta geofísica mediante as modernas técnicas de aquisição, processamento e apresentação dos dados adquiridos. Além disso, este novo contexto apresentado em nível mundial permitiu a reavaliação de antigos bancos de dados sob uma ótica diferente.

3.2 - RESPOSTAS GEOFÍSICAS EM MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS EM TERRENOS ARQUEANOS

As principais fontes de ouro no mundo encontram-se nos escudos pré-cambrianos da África do Sul, Rússia, Canadá, Brasil e Austrália. A mineralização aurífera em terrenos arqueanos contribui em torno de 15% da produção mundial (Eberle 1995). Esse tipo de ambiente geológico favorece a exploração através de indicações geofísicas indiretas como associações com algumas rochas hospedeiras, estruturas

que apresentem feições características de magnetização, polarização elétrica e condutividade/ resistividade elétrica. Existem alguns marcadores úteis, entre eles, doleritos magnéticos, piritas e outros sulfetos metálicos que podem formar corpos condutores e/ou polarizáveis, formações ferríferas bandadas, terrenos de pláceres fósseis e zonas silicificadas mais resistivas do que as rochas circundantes. Além disso, pode-se associar depósitos auríferos com falhas e zonas de cisalhamento, permitindo a utilização de métodos elétricos e magnéticos (Doyle 1990).

É importante mencionar as restrições da exploração geofísica de depósitos arqueanos em função da diversidade no tamanho e forma dos corpos, concentração e mineralogia dos sulfetos, extensão da alteração por carbonatação e extensão do consumo de magnetita e ilmenita nas reações de alteração (Doyle 1990). Além disso, apesar do ouro possuir altos valores de condutividade (5×10^7 S/m) e densidade (19.3 g/cm^3), os baixos teores nas rochas (poucos gramas por tonelada) tornam quase impossível uma resposta direta na aplicação das técnicas geofísicas. Nesse caso, sua utilização é voltada mais para o mapeamento de ambientes geológicos propícios à mineralização do que para o reconhecimento de suítes minerais. Estas, quando detectadas, são de forma indireta, a exemplo do mapeamento de corpos de sulfeto maciço por métodos eletromagnéticos, magnetométricos, gravimétricos.

A magnetometria tem sido a técnica principal no mapeamento de estruturas favoráveis e de rochas hospedeiras do minério. Subsidiariamente, são utilizadas técnicas elétricas, eletromagnéticas (sítios condutivos associados a sulfetos) e gamaespectrométricas (mapeamento de zonas de alteração hidrotermal e de unidades geológicas) (Dentith *et al.* 1997 e Dentith & Middleton 2000). As técnicas empregadas no levantamento aerogeofísico do PRV não são exceção. Os rígidos parâmetros estabelecidos na sua concepção e realização, somados às atuais ferramentas de processamento digital de dados, promoveram excelentes condições para estudos de análise geofísica (dados aéreos magnetométricos, gama-espectrométricos e eletromagnéticos) nos terrenos arqueanos do tipo *greenstone*.

A mineralogia de minério em depósitos auríferos é simples, podendo o ouro ocorrer na forma nativa ou associado com pirita±pirrotita±arsenopirita (Groves *et al.* 1990). Existem minerais de rara abundância e concentração que possuem um

significado geofísico e mantém uma forte correlação com os minerais de minério, entre eles sulfetos de estibinita, tetraedrita, molibdenita, galena, esfalerita e calcopirita, e óxidos de ferro de magnetita e hematita (Dentith et al. 1994). A presença de sulfetos associados ao ouro é mais comum, embora haja a ocorrência independente da mineralização. Nos casos de associação, as técnicas elétricas e eletromagnéticas revelam um bom desempenho. Coggon e Rutherford (1994) distinguiram zonas condutivas (ouro-pirrotita) em formações ferríferas cisalhadas no depósito de ouro Bounty, *Greenstone Belt* Arqueano de Florestania (oeste da Austrália). Porém, várias zonas mapeadas apresentaram sulfetos estéreis.

Um aspecto relevante no controle da mineralogia dos sulfetos é a intensidade do metamorfismo. Com algumas exceções, em depósitos que apresentam fácies xisto verde, os minerais de minério predominantes são pirita e/ou arsenopirita. Já naqueles de fácies anfibolito, a contribuição da pirrotita pode ser dominante em relação à pirita e à arsenopirita (Dentith et al. 1984).

A seguir, é apresentada uma revisão dos métodos geofísicos utilizados no presente trabalho. O objetivo desta revisão é destacar aspectos importantes da fundamentação teórica e aplicações de cada método na exploração geofísica de terrenos arqueanos do tipo *greenstone*, provendo o suporte teórico inicial necessário ao entendimento das discussões apresentadas. Para um aprofundamento do conhecimento das bases teóricas de cada método recomenda-se, entre outras, referências como Blakely (1996), Sharma (1986), Robinson & Coruh (1988), Nabighian (1987), Leite (1998), (Mares 1984), Solovov (1985), entre outros. Quanto às aplicações de cada método na exploração geofísica, existem, da mesma forma, revisões de alta qualidade, como os trabalhos de Palacky (1986), Gunn (1979), Hood et al. (1979), Dentith et al. (1984) e edições especiais em revistas como Hodgson (1997) e Dentith & Middleton (2000).

3.3 - LEVANTAMENTOS MAGNETOMÉTRICOS

Conforme já mencionado, a magnetometria é a técnica mais antiga, mais simples, e mais amplamente utilizada, tanto para exploração de ouro, quanto para o mapeamento de metais e estruturas associadas com depósitos minerais. O método magnetométrico é utilizado, principalmente, nos estágios iniciais da pesquisa, fornecendo informações rápidas e de baixo custo sobre a geologia regional e estruturas presentes, principalmente em áreas de difícil acesso ou pobres em afloramentos.

Em setembro de 1973, a Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia recomendou a adoção da unidade do Sistema Internacional (SI) no geomagnetismo. Neste sistema, todos os campos magnéticos, sejam no vácuo, ar ou dentro de um corpo magneticamente permeável, são descritos fundamentalmente pela densidade de fluxo (campo-B). As unidades de maior interesse para a exploração geofísica são: campo magnético (B), intensidade de magnetização (J), momento magnético (M), susceptibilidade magnética (k) e permeabilidade magnética do espaço livre (μ_0). A Tabela 3.1 apresenta estas unidades.

Tabela 3.1 – Quantidades magnéticas e suas unidades (Fonte: Sharma 1987).

Quantidade	Unidade SI	Unidade equivalente em e.m.u.c.g.s
Campo magnético (B)	Tesla (T)	10^4 gauss (G) *
Subunidade para campo magnético (B)	Nanotesla (nT)	$1\gamma = 10^{-5}$ G
Magnetização (J)	Ampere/metro (A/m)	10^3 e.m.u.
Momento magnético (M)	Ampere/metro ² (A/m ²)	10^3 e.m.u.
Susceptibilidade (k)	Adimensional (SI)	4π e.m.u.
Constante de permeabilidade (μ_0)	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henry m ⁻¹ (p/ vácuo)	1 (para vácuo)

* A unidade oersted (Oe) é, algumas vezes, utilizada para campo magnético para o caso de densidade de fluxo. Isto pode ser considerado incorreto, pois, no sistema e.m.u.c.g.s, a unidade para fluxo magnético é Gauss.

O método magnetométrico explora o fato de que variações nas propriedades magnéticas das rochas *in situ* resultam em perturbações no campo magnético, que podem ser medidas remotamente na superfície ou em poços. As variações medidas no campo magnético (anomalias) são interpretadas em termos da geometria e das propriedades magnéticas dos corpos causadores em profundidade (Blakely 1996). Neste aspecto, dois parâmetros petrofísicos importantes para o método magnetométrico são a susceptibilidade magnética e/ou a magnetização remanescente das rochas (Sharma 1997). Através destes parâmetros são realizados mapeamentos do contraste magnético entre diferentes litologias, representado por relevos magnéticos distintos, ou seja, relevos suaves (rochas sedimentares, exceto formações ferríferas e algumas rochas metamórficas), relevos acidentados (algumas rochas ígneas e metamórficas), etc. Pode-se, por exemplo, identificar corpos de rochas vulcânicas cujos minerais ferromagnéticos foram destruídos por carbonatação, através da observação da diminuição dos valores das anomalias magnéticas. Este método possibilita, desta forma, o delineamento e modelagem de corpos rochosos e de suas tendências estruturais, da profundidade e dos alinhamentos do embasamento, além da caracterização de propriedades magnéticas das rochas. A magnetita é o mineral principal que controla a intensidade da susceptibilidade das rochas. Na prospecção de ouro é um excelente marcador, seja pela sua depleção (baixos valores associados à sua destruição pela carbonatação), principalmente em rochas vulcânicas máficas, ou pela sua presença na forma de halos contornando intrusões silicosas (Doyle 1990). Além da magnetita, vale citar a associação da pirrotita com ouro, que é um sulfeto magnético.

Existe uma série de feições geológico-estruturais que possuem características magnéticas consideradas guias para a definição (mapeamento) de ambientes com mineralização aurífera associada a rochas vulcânicas. São elas: *greenstone belts* (em escala regional), zonas de falhamentos principais, áreas de alteração, rochas ultramáficas serpentinizadas e formações ferríferas na proximidade ou em zonas de alteração, e camadas de rochas máfica-ultramáficas intensamente alteradas dentro de zonas vulcânicas (Grant 1984).

3.3.1 - RESPOSTAS DO CAMPO MAGNÉTICO COM BASE EM MODELOS GEOMÉTRICOS

Os fatores que controlam a forma e amplitude das anomalias magnéticas estão diretamente relacionados à forma da fonte e seu posicionamento na Terra, sua orientação em relação ao norte magnético, sua profundidade abaixo do ponto de observação e seu grau e direção de magnetização. Esse conjunto de variáveis, quando não levado em conta, pode acarretar erros de processamento, bem como de interpretação dos resultados obtidos. Para compreender a influência destes fatores é necessária uma apresentação dos princípios que regem a geração de uma anomalia magnética.

O campo magnético da Terra tem natureza dipolar e pode ser representado por um vetor num ponto de observação qualquer. Este vetor resulta da combinação de diversas variáveis, conforme ilustrado na Figura 3.1. A declinação magnética (D) é o ângulo entre as direções do norte geográfico e do norte magnético, por convenção, negativo no sentido anti-horário. A inclinação (I) é o ângulo entre a direção do campo e o plano horizontal, por convenção, negativa no hemisfério sul. A intensidade do campo total (F) pode ser decomposta nas componentes vertical (Z) e horizontal (H). A componente H pode ser decomposta nas componentes de intensidade X , ao longo do norte geográfico (N), e Y , na direção do este (E).

Estes elementos podem ser combinados da seguinte forma:

$$F^2 = H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (3.1)$$

$$F = \frac{H}{\cos(I)} = \frac{Z}{\sin(I)} \quad (3.2)$$

$$\cos(I) = X/H$$

$$\sin(I) = Y/H$$

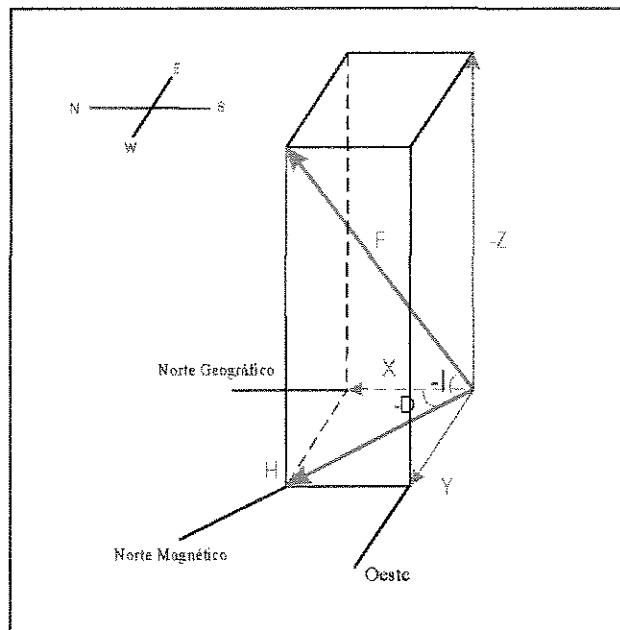


Figura 3.1 – Elementos do campo magnético da Terra para o Hemisfério Sul. D - declinação magnética, I – inclinação magnética, F - campo total, H – componente horizontal, X – componente norte, Y – componente oeste, Z – componente vertical.

Quaisquer combinações desses três elementos magnéticos são suficientes para descrever vetorialmente o campo magnético terrestre.

O campo magnético terrestre é composto por três partes:

- campo magnético principal: componente mais intensa do campo magnético terrestre, provavelmente originado por correntes elétricas presentes nos fluidos do núcleo externo da Terra,

- campo anômalo: componente mais irregular e de menos intensidade associada ao magnetismo das rochas da crosta terrestre. O magnetismo dessa parte do campo pode ser causado tanto por indução do campo magnético principal da Terra, como por magnetização remanescente,

- campo externo: componente relativamente menor do campo magnético que é gerada por fontes magnéticas externas à Terra. Acredita-se que este campo seja produzido por interações da ionosfera terrestre com os ventos solares. Além disso, as

variações temporais associadas ao campo magnético externo também estão correlacionadas à atividade solar.

Os efeitos das variáveis apresentadas geram uma série de modificações na forma e amplitude da anomalia magnética, dificultando sua interpretação. Uma alternativa a este problema é a análise de anomalias a partir modelos geométricos simples, onde se pode isolar a variável desejada. A Figura 3.2 ilustra como as anomalias magnéticas causadas por esferas magnéticas variam em relação à inclinação do campo magnético terrestre. As linhas de campo são indicadas pelas linhas pretas, e a força e direção do campo anômalo à superfície da terra são mostradas pelas setas azuis.

- Esfera magnetizada no pólo norte (Figura 3.2a): no pólo norte magnético o campo magnético principal da Terra aponta diretamente para baixo. Neste caso, o campo magnético anômalo é simétrico em relação ao centro da esfera, sendo dominado por uma anomalia positiva central, rodeada em ambos os lados por valores negativos de menor amplitude. Em mapas a anomalia apresenta uma simetria radial.

- Esfera magnetizada no equador (Figura 3.2b): no equador magnético a direção do campo geomagnético torna-se horizontal e induz um campo magnético anômalo na esfera. Neste caso, a orientação de linhas de campo que descrevem o campo magnético é girada 90° em relação à situação anterior. Sobre a esfera, o campo magnético anômalo agora aponta na direção oposta à direção do campo magnético principal. Conseqüentemente, o campo total medido será menor que o campo principal da Terra, resultando num campo anômalo negativo com a remoção do campo principal. Em qualquer lado da esfera, o campo anômalo aponta na direção geral do campo principal, reforçando-o e resultando em medidas de campo total maiores que as do campo principal da Terra. Removendo a contribuição de campo principal, estas áreas mostrarão anomalias magnéticas positivas. A anomalia resultante é novamente simetricamente distribuída sobre o centro da esfera, mas a anomalia central é negativa e envolvida por duas anomalias positivas menores.

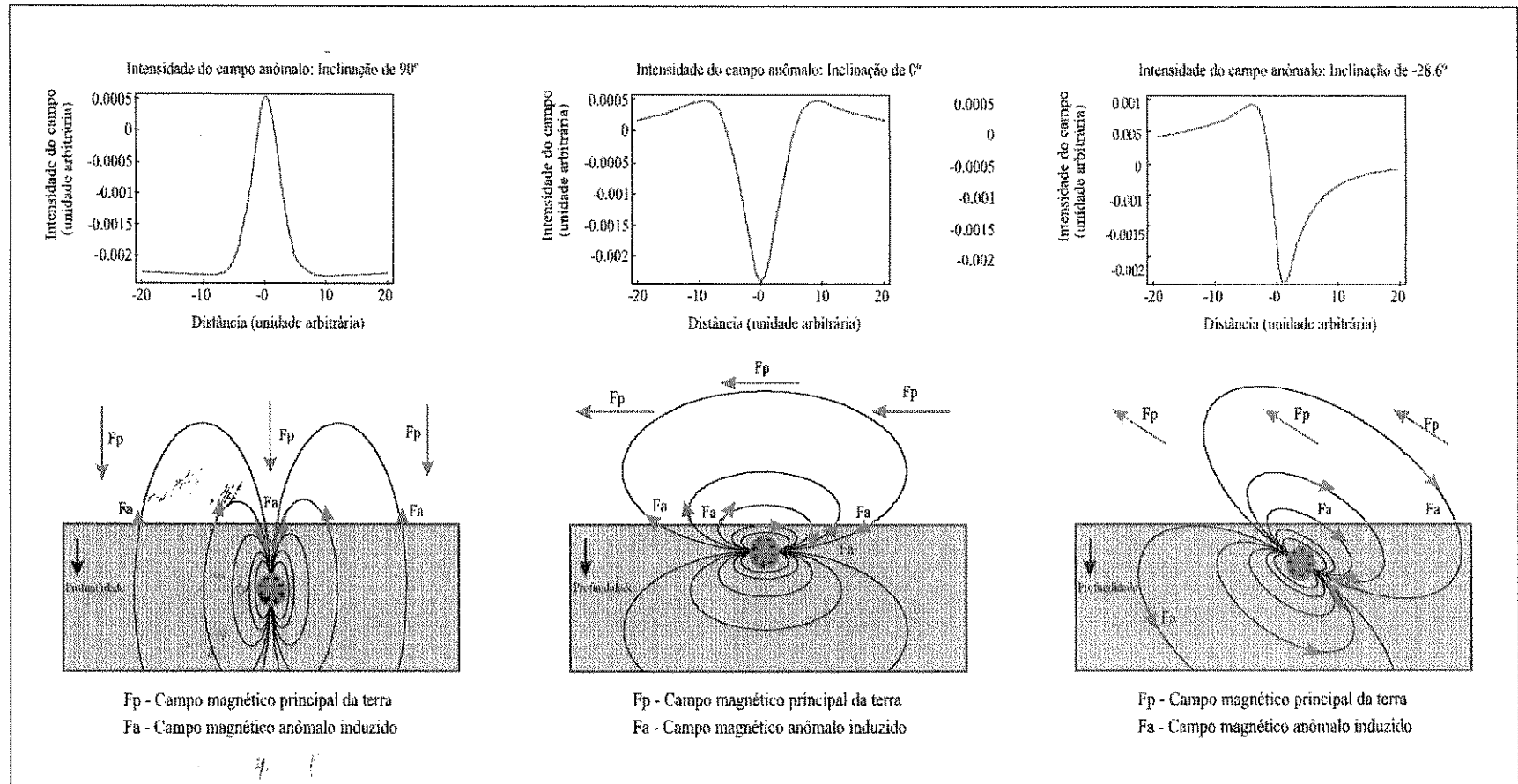


Figura 3.2 - Anomalias magnéticas causadas por esferas magnéticas em diferentes direções de inclinação do campo magnético terrestre.

- Esfera magnetizada no hemisfério sul em meia latitude magnética (Figura 3.2c): como nos exemplos anteriores, o campo magnético principal da Terra induz um campo anômalo cercando a esfera. Neste modelo, o campo anômalo é orientado num ângulo horizontal de $-28,6^\circ$. Observa-se que a anomalia torna-se assimétrica, produzindo um pequeno pólo positivo suavizado ao norte da esfera. Ao sul da esfera observa-se uma parte negativa maior e de gradiente mais abrupto.

A partir dos modelos discutidos acima e das características do levantamento aeromagnetométrico do PRV, pode-se prever a forma e amplitude de anomalias presentes na área de estudo. Os alvos magnéticos da área de estudo estão associados a unidades litológicas fortemente orientadas por eventos tectônicos direcionais, onde a maioria das rochas encontra-se alinhada segundo a direção NW-SE, limitadas por contatos tectônicos de mesma direção e com cavalgamentos que mergulham de 30° a 65° para NE. De uma forma geral, as respostas esperadas para as anomalias magnéticas correspondentes podem ser avaliadas com base em modelos por prismas retangulares. A Figura 3.3 mostra diversos perfis N-S de intensidade magnética de uma placa de extensão infinita na direção E-W magnética, com direções e mergulhos variados para uma inclinação magnética de $-28,6^\circ$ e uma declinação magnética de 0° . Nesta latitude o vetor do campo magnético terrestre tem a parte positiva de seu dipolo apontando para fora da superfície do terreno (conforme já mencionado), atravessando a fonte magnética nesta mesma direção. Esse comportamento das anomalias é bem evidente na área de estudo, em função da orientação das linhas de vôo do PRV, projetadas a 90° da direção principal das rochas e diferindo em torno de 30° com a direção da declinação magnética. Este arranjo é ilustrado no quadro A da Figura 3.3, onde prismas de I, II e III representam, de uma forma geral, os posicionamentos das rochas na área, principalmente na ZCSV, cujos mergulhos variam entre 30° e 65° para NE. Nesse quadro, observa-se que os pólos negativos e positivos estão induzidos para sul (direita do perfil) e norte (esquerda do perfil) da placa, respectivamente. Nos prismas I e II, o pólo positivo apresenta-se menor e mais suavizado, enquanto que o pólo negativo apresenta-se com maior amplitude e gradiente mais abrupto.

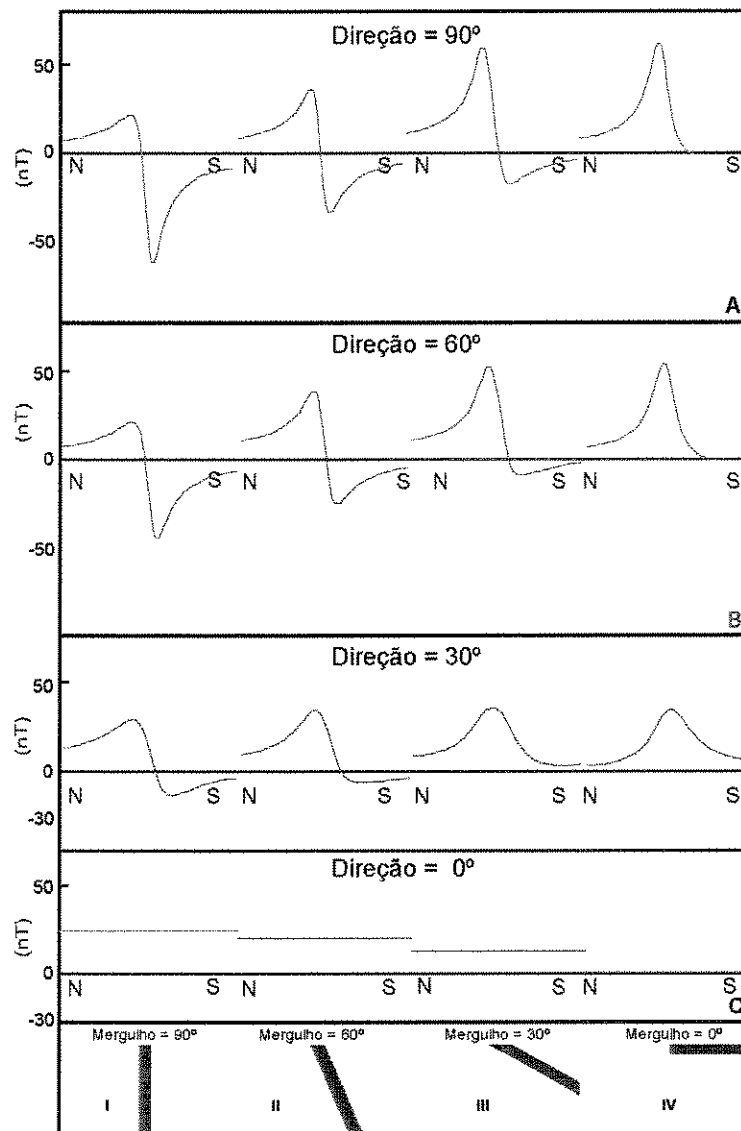


Figura 3.3 – Modelos de anomalias magnéticas para placas finas de extensão infinita no plano perpendicular à folha de papel, com diferentes mergulhos e direções. Inclinação magnética: -30° , declinação magnética: 0° . Direções dos prismas: 90° (A), 60° (B), 30° (C) e 0° (D). Ângulos de mergulho dos prismas: 90° (I), 60° (II), 30° (III) e 0° (IV). Fonte: Gunn (1998).

3.4 - LEVANTAMENTOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Os métodos de prospecção que empregam a radioatividade tornaram-se importantes no século XX em função da crescente demanda de urânio durante as I e II guerras mundiais, além do mapeamento de minerais relacionados a corpos de minério e estruturas. Mais de 200 tipos de isótopos atômicos radioativos são fonte de radiações α , β e γ , onde os elementos urânio, tório e potássio constam como os mais importantes na composição das rochas e que causam a radiação γ .

A pesquisa geofísica por elementos radioativos na crosta terrestre envolve a locação de áreas com emissão de radiação γ anormal, pois os raios α e β são comparativamente de baixa penetração e indetectáveis assim que o depósito for coberto por uma fina camada de solo de alguns centímetros (Sharma 1986). Neste contexto, a radiometria pode utilizar a cintilometria^{3.1} na identificação de locais com maior concentração de radioelementos ou, na gamaespectrometria, na estimativa das concentrações de potássio (K) e dos equivalentes de urânio (eU) e tório (eTh). Normalmente, a unidade de medida da atividade radioativa é a contagem por segundo, podendo ser convertida em partes por milhão (ppm) no caso dos equivalentes de U e Th, e em porcentagem (%) de K. Esta medição é realizada por sensores compostos, geralmente, de cristais de iodeto de sódio ativado por Tálio. A Figura 3.4 apresenta o espectro de raios gama registrado a uma altitude de 100m, mostrando as diferentes posições das janelas onde são medidos o K (relativo ao ^{40}K), o urânio (relativo ao ^{214}Bi) e o tório (relativo ao ^{208}Tl).

A radiação gama é atenuada por materiais posicionados entre a fonte e o detector, o que limita sua profundidade de investigação em, aproximadamente, 35 cm no caso de levantamentos aéreos. Desta forma, a identificação de tipos litológicos com base neste método é um processo estatístico que exige cautela, principalmente em ambientes de clima tropical, onde a radiação pode estar atenuada devido a diversos fatores, entre eles, o intemperismo e a presença da cobertura vegetal.

^{3.1} Técnica utilizada para medir a intensidade dos raios gama. O cintilômetro, instrumento utilizado, é constituído por cristais de iodeto de K e de células fotoelétricas. Ao ser atingido por uma radiação gama, o cristal emite cintilações luminosas que, depois de detectadas e amplificadas pela célula fotomultiplicadora, são convertidas em intensidade de radiação. Fonte: Duarte (1997).

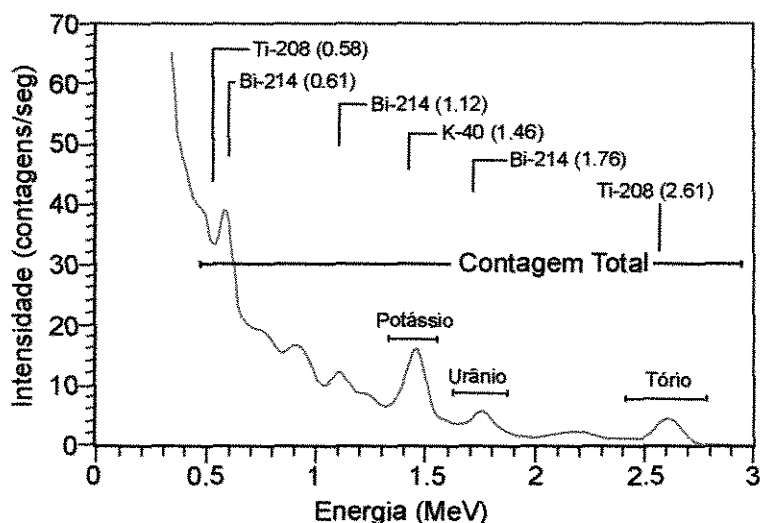


Figura 3.4 - Espectro de raios-gama registrado a 100 m de altitude mostrando as janelas de potássio, urânio, tório e contagem total. Fonte: Wilford *et al.* (1997).

O potássio ocorre na crosta terrestre numa concentração média de 2,5% e está amplamente distribuído na litosfera. As maiores concentrações de potássio estão nos minerais de feldspatos potássicos, leucita, nefelina, biotita, muscovita, sericita e flogopita das rochas metamórficas e magmáticas. Sob condições intempéricas, o K pode ser lixiviado ou incorporado na formação de minerais de argila. Processos de alteração associados a mineralizações hidrotermais podem aumentar localmente as concentrações de K.

A concentração média de tório na crosta terrestre está entre 8 e 12 ppm, estando também presente na composição de minerais acessórios como monazita, zircão, esfeno, epidoto, apatita e ortita. É um elemento estável e sua forma de movimento se dá por transporte mecânico. O Th, juntamente com U, podem ter suas concentrações relativamente aumentadas durante o intemperismo de rochas máficas e ultramáficas, devido à incorporação destes elementos nos óxidos de ferro e argilas (Solovov 1985).

O urânio está presente na crosta terrestre em concentrações que variam, em média, de 2 a 4 ppm, podendo ser encontrado em minerais acessórios como zircão, esfeno, apatita, xenotimo, monazita e ortita. Devido à sua relativa mobilidade sob

diferentes condições de temperatura e pressão, o equilíbrio radioativo entre as séries ^{238}U e ^{226}Ra é freqüentemente perturbada na natureza.

Uma importante aplicação deste método na prospeção de ouro em terrenos do tipo *greenstone* está na identificação de halos de elementos radioativos presentes nos depósitos de alteração hidrotermal, através das relações entre a distribuição de eU, eTh e K. Além disso, existe a possibilidade de detecção direta de urânio, muitas vezes associado a depósitos auríferos. (Ostrovski 1974). A Tabela 3.2 apresenta algumas relações entre K, U e Th e depósitos de elementos não radioativos.

3.5 – LEVANTAMENTOS GEOELÉTRICOS

Em contraste com outros métodos geofísicos, os métodos geoeletricos caracterizam-se por uma variedade de técnicas que mede atributos geofísicos distintos da Terra, a partir de uma série de instrumentos e procedimentos. Estes métodos de exploração têm como princípio testar o fluxo de corrente elétrica no subsolo a partir de suas características de resistividade e permissividade elétrica. A corrente elétrica pode ocorrer de três formas: condução ôhmica (fluxo de elétrons, principalmente, através da estrutura cristalina de minerais); condução eletrolítica (fluxo de íons dissolvidos em água subterrânea, massas permeáveis, sedimentos inconsolidados ou rochas) ou condução dielétrica (deslocamento cíclico de íons numa estrutura cristalina). Neste deslocamento, as substâncias agem no sentido de retardar o fluxo de corrente elétrica, implicando num gasto de energia, ou seja, num movimento de partículas carregadas. A extensão da resistência a este movimento é chamada de *resistividade elétrica*, sendo esta propriedade física um dos principais parâmetros na identificação de acamamentos e estruturas na Terra (Robinson e Çoruh 1988).

Os métodos elétricos podem ser classificados de várias formas, com base nas configurações de campo, aplicações e procedimentos de interpretação ou até em nomes de instrumentos utilizados.

Tabela 3.2 - Relações entre K, U, Th e depósitos de elementos não-radioativos.
Fonte: Ostrovskii (1974).

Depósitos hidrotermais-metassomáticos					
Elemento do minério		Principais alterações da rocha-fonte	Elementos radioativos no minério e na rocha-fonte		
Principal	Subordinado		Incremento	Neutro	Removido
Li, Cs, Be,	(Ta, Nb), Ti	Albitização	Th, U		K
TR, Zr	Ti	Albitização, carbonatação	Th, (U)		K
Ta, Nb	Ti	Albitização, carbonatação	Th, U		K
Sn	W	Albitização, silicificação, turmalinitização, sericitização	Th, (U) K, (Th)	(K) U	K
Mo		Enriquecimento em K-feldspato, silicificação	K, U, (Th)		(Th)
W	Mo	Greisenização, silicificação	Th, (U)	(K)	K
Be	W, Sn	Formação de micas, silicificação, fluoritização	U, (Th) Th, (U)	(K) U, K	K
Au	Ag	Adularização, sericitização	K	(Th)	(Th)
	U	Alularização, carbonatação, origem de anidrita	K, U	Th	(Th)
	Cu, Pb, Zn Ba	Sericitização, adularização, argilização	K, (Th)	U	(Th)
Ni, Co, Bi, Cu, Pb, Ag, U	Gd, Ge, Zn	Cloritização, sericitização, adularização	U, (K)	Th	(Th)
Hg, Sb, As	Fluorita	Argilização, silicificação, sericitização	(U)	U, Th, K	

De acordo com Mares (1984) os métodos elétricos classificam-se em: métodos eletroquímicos (polarização induzida e potencial espontâneo), eletrorresistividade e métodos eletromagnéticos. Hoover *et al.* (1992) dividem esse método em 5 classes: potencial espontâneo, polarização induzida, excitação à massa (*mise-à-la-masse*), resistividade galvânica e resistividade eletromagnética (ou eletromagnético).

3.5.1 - MÉTODO ELETROMAGNÉTICO (EM)

Desde o início do século XX, os levantamentos geofísicos têm mostrado que grandes variedades de depósitos minerais são altamente condutivas, principalmente os sulfetos maciços de terrenos pré-cambrianos do tipo *greenstone belts*, importantes fontes de chumbo, cobre, zinco, prata, ouro e níquel (Palacky & West 1996). Desta forma, os levantamentos de campo com medidas de resistividade começaram a ser utilizados de forma regular.

Na metade do século passado, o método eletromagnético foi adaptado para plataformas aerotransportadas (aviões e helicópteros), iniciando-se uma grande evolução nos sistemas de aquisição. No Brasil, o reflexo desta evolução se deu na década de 1970 com os trabalhos pioneiros de avaliação do método em terrenos tropicais (Palacky & Kadokaru 1978 e Palacky & Sena 1979).

A classe dos métodos eletromagnéticos é muito diversificada e inclui a utilização de campos naturais, transientes ou monocromáticos (de uma só frequência), assim como campos com variações num amplo espectro de frequência. Em função destas variações, de acrônimos distintos e até nomes comerciais, muitas vezes, há uma dificuldade em propor uma classificação padronizada. A Tabela 3.3 mostra uma proposta de classificação de Hoover *et al.* (1992) para os métodos eletromagnéticos, juntamente com algumas técnicas pertencentes a cada subdivisão. Apesar de toda a diversidade do método, fundamentalmente, as medições são relativas às variações de impedância elétrica na Terra. Alguns dos métodos eletromagnéticos listados são técnicas híbridas como, por exemplo, aqueles onde o contato galvânico com a terra se dão pela fonte transmissora (TURAIR, CSAMT, etc.) ou pela fonte receptora (AMT, MT, VLF, telúrico, etc.). Porém, esses métodos foram classificados como eletromagnéticos, pois medem campos variáveis no tempo. O primeiro critério de subdivisão é baseado nos princípios físicos da indução eletromagnética. As subdivisões subsequentes são baseadas no tipo de técnica: perfilagem ou sondagem. A terceira subdivisão é baseada no tipo de plataforma: aérea ou terrestre. A última subdivisão classifica o método de acordo com o domínio de aquisição: do tempo ou da frequência.

A profundidade de penetração atingida por cada sistema é bastante variável, dependendo das frequências empregadas, da resistividade do substrato e da distância

entre o transmissor e o receptor. Para métodos aerotransportados de fonte controlada, a profundidade máxima atingida é da ordem de 100 metros. Os aerotransportados de fonte natural (AFMAG) têm maior potencial de penetração, mas não são muito utilizados. Assim como as técnicas de resistividade galvânica, as sondagens podem ser realizadas mudando-se a distância transmissor-receptor. Na prática, estas sondagens normalmente são utilizadas na exploração rasa. No entanto os métodos eletromagnéticos também permitem sondagens por variação da frequência ou de janelas de tempo para os sistemas no domínio de tempo, tornando-se cada vez mais importantes na exploração e caracterização das estruturas em profundidades.

A distribuição do campo eletromagnético num meio depende de uma série de fatores, destacando-se as propriedades físicas das rochas que preenchem este meio (Mares 1984). Este grande número de variáveis dificulta a sua aplicação e a interpretação dos resultados, tornando-o mais complexo do que os demais métodos.

Partindo-se dos princípios físicos que regem o eletromagnetismo, sabe-se que uma corrente elétrica, quando passa por um fio condutor, gera um campo magnético. Se a corrente variar no tempo, o campo pode induzir o surgimento de correntes elétricas num corpo condutor qualquer situado em sua área de influência. Desta forma, essas correntes originarão um campo magnético secundário com informações sobre o corpo atingido, sendo também função da distância da fonte transmissora e geometria do arranjo de bobinas (Mares 1984).

A resistividade de um corpo é inversamente proporcional à amplitude da resposta e diretamente proporcional à componente fora de fase (em quadratura). Portanto, através do estudo das variações na condutividade/resistividade das rochas registradas pelo método eletromagnético, é possível associar estas respostas às ocorrências de sulfetos maciços, grafite, falhas condutivas, zonas de fraturas e rochas silicificadas mais resistivas. Estas medidas eletromagnéticas em levantamentos aerotransportados são influenciadas pela composição e espessura do manto de alteração das rochas (Palacky 1988).

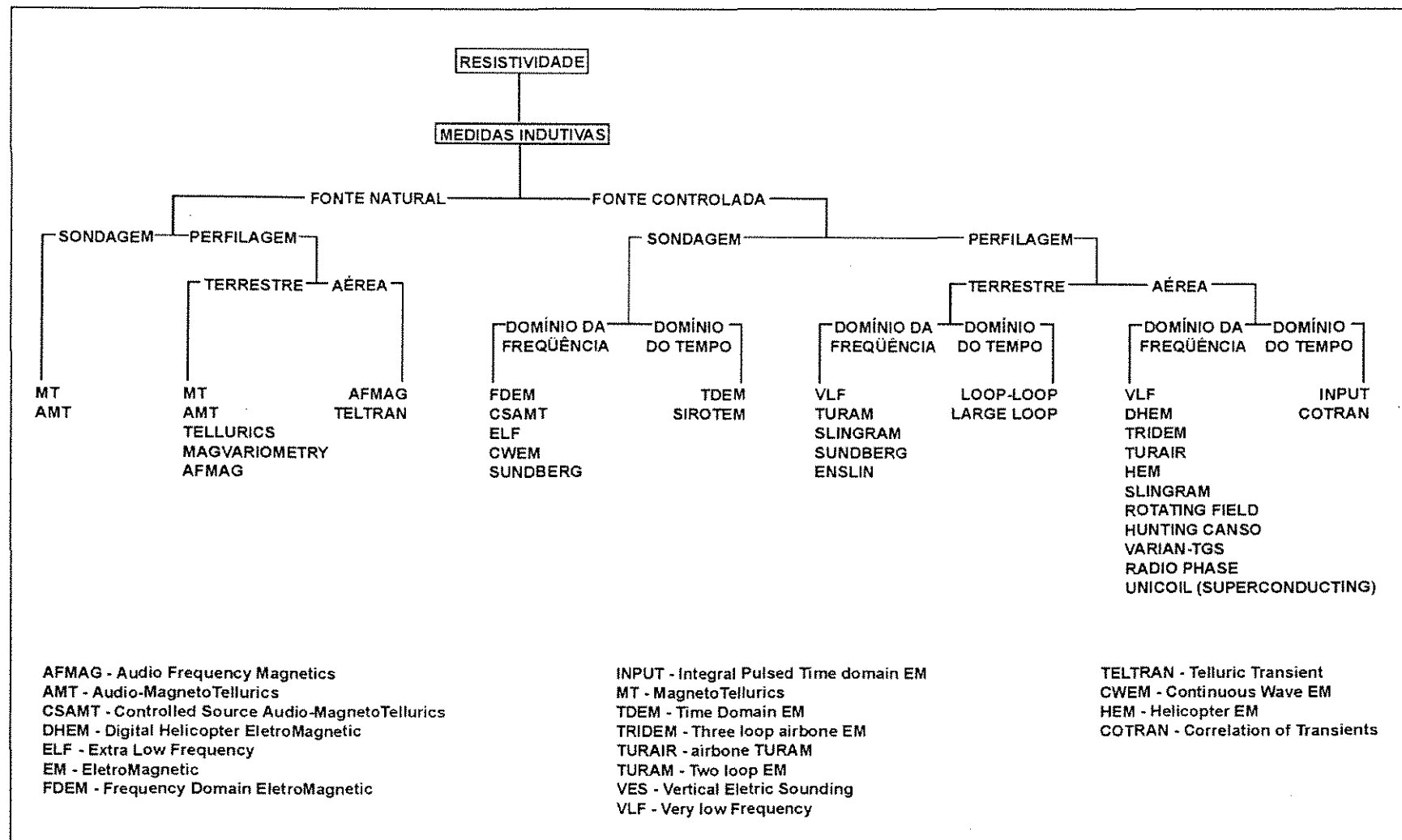


Tabela 3.4 - Classificação dos métodos eletromagnéticos. Fonte: (Hoover *et al.* 1984)

A Figura 3.5 ilustra os princípios gerais do método eletromagnético, onde bobinas horizontais (uma transmissora e uma receptora) encontram-se dispostas acima de um corpo condutor. Uma corrente alternada flui no transmissor com uma frequência determinada, gerando um campo magnético alternado (campo primário), que se propaga pela região que contém o corpo condutor e a bobina receptora. Esse campo, quando passa através do corpo condutor, induz uma corrente elétrica que gera outro campo magnético alternado (campo secundário), que se propaga até a bobina receptora. O campo magnético total que chega ao receptor é composto pelos campos primário e secundário. Uma vez registrado o valor da intensidade do campo magnético combinado, é possível compará-lo com os valores de intensidade do campo primário, cujas amplitude e fase são conhecidas.

O princípio básico do registro da intensidade do campo magnético combinado é o mesmo para todos os sistemas EM que empregam duas bobinas e pode ser demonstrado pela Figura 3.6. A ilustração mostra que o campo combinado que chega no receptor (campos primário e secundário) possui uma amplitude diferente, com picos e depressões deslocados em relação ao campo primário. Este deslocamento é chamado de deslocamento de fase. Através de modelos matemáticos, usualmente empregando modelos de camadas, é possível reproduzir a forma deste campo combinado. Isto é feito através de curvas senoidais de mesma frequência, uma em fase (picos e depressões alinhados com o campo primário) e a 90° , fora de fase (picos e depressões do campo fictício alinhados com os pontos médios entre os picos e depressões do campo primário), também denominado em quadratura.

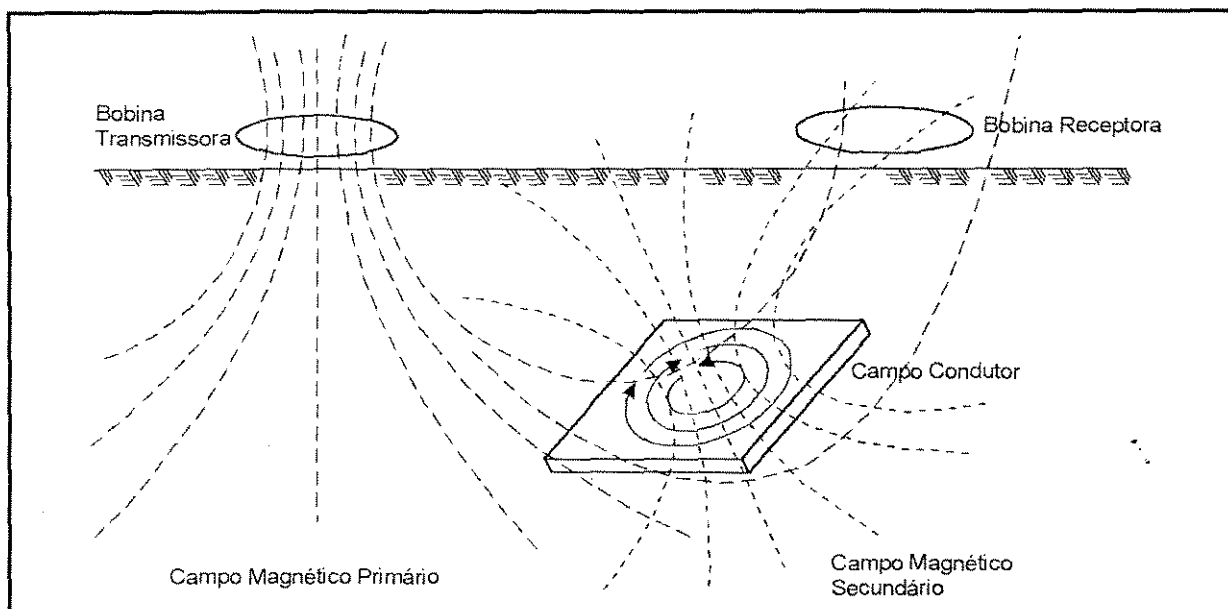


Figura 3.5 - Princípios gerais do método eletromagnético. Bobinas transmissora e receptora utilizadas e as linhas magnéticas dos campos primário e secundário correspondentes. Fonte: Robinson & Çoruh (1988).

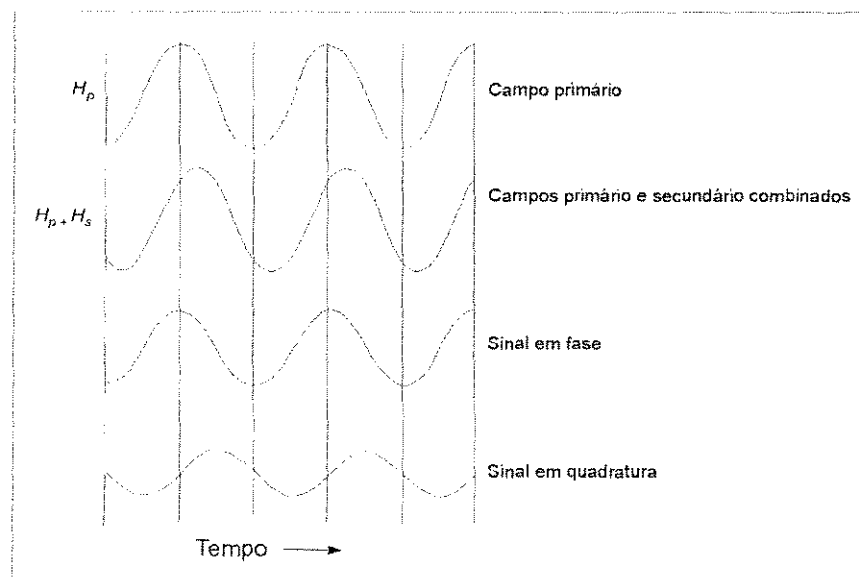


Figura 3.6 - Campos magnéticos primário e combinação de primário e secundário no local de uma bobina de recepção de EM, e os sinais em fase e de quadratura que se somam para reproduzir o campo combinado. As amplitudes dos sinais em fase e de quadratura são medidas em cada posição de gravação ao longo das linhas transversais na área de levantamento. Fonte: Robinson & Çoruh (1988).

As variações dos sinais em fase e quadratura são analisadas através de circuitos eletrônicos comparando-os com curvas características de modelos idealizados para corpos condutores.

As técnicas eletromagnéticas têm evoluído muito e as diferentes configurações dos sistemas de aquisição de dados dependem do grau de penetrabilidade requerido em subsolo e da relação sinal/ruído (surgimento de anomalias fictícias). Estes fatores estão diretamente associados à distância entre as bobinas transmissora e receptora. Existe uma variedade de configurações de transmissores e receptores aerotransportados (formato, tamanho e orientação), medindo-se sempre alguma relação entre os campos primário e secundário. Ward & Fraser (1971) fazem uma excelente discussão sobre os problemas que podem surgir durante a aquisição destes dados e suas possíveis soluções. Uma boa apresentação sobre a história da evolução destes sistemas de aquisição pode ser encontrada em Palacky & West (1996). A Figura 3.7 ilustra a configuração básica para levantamentos eletromagnéticos transportados por helicóptero (HEM).

Atualmente, a plataforma mais utilizada é o helicóptero, principalmente, em terrenos com topografia irregular, além da redução da distância sensor-fonte e do aumento da exatidão de locação de pontos de controle (eliminação da necessidade de *follow-up*). Desde o final de 1970, a maioria dos helicópteros usa configurações com 2 bobinas (coaxial vertical e coplanar horizontal) e múltiplas frequências. O sistema utilizado no PRV (modelo Aerodat-5) foi configurado com três bobinas horizontais coplanares e duas verticais coaxiais, afastadas de aproximadamente 7 metros e a uma distância de 30 metros do helicóptero ou avião. Estes parâmetros estão de acordo com as especificações apresentadas por Ward & Fraser (1971). Maiores detalhes sobre o modelo Aerodat-5 podem ser encontrados no Capítulo 4 e em Palacky & West (1996).

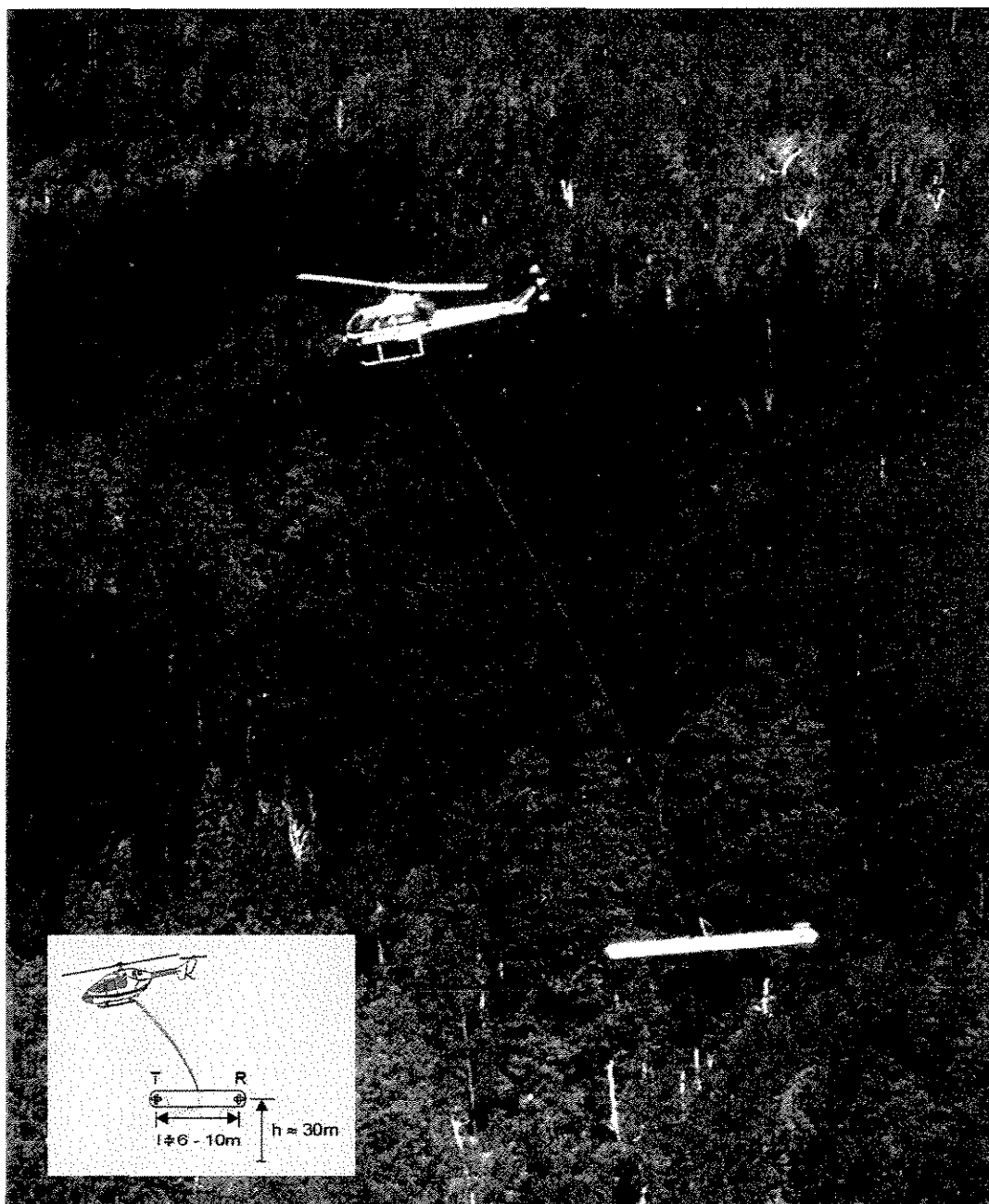


Figura 3.7 - Configuração básica parlevantamentos eletromagnéticos transportados por helicópteros.
Fonte: Fraser (1978).

3.5.2 – MÉTODO *VERY LOW FREQUENCY* (VLF)

O método *Very Low Frequency* (VLF) é, essencialmente, baseado na medição do ângulo de inclinação de uma onda de rádio operando em uma frequência específica na faixa de 15 a 30 kHz (faixa VLF). É um método passivo, pois uma fonte distante é usada como um transmissor de sinal de ondas de rádio nas faixas de 5 a 30 kHz que operam em diferentes países. A componente do campo magnético principal é horizontal e as linhas do campo magnético são círculos concêntricos em volta de uma da antena. Para distâncias muito longas do transmissor, o campo primário pode ser considerado uniforme, com um azimuth em ângulos retos em relação à orientação do transmissor do ponto de observação.

Segundo Doyle (1990), o método VLF é muito utilizado na América do Norte como um rápido mapeador de condutividade, mas não muito aplicado em áreas de baixa resistividade superficial, como a Austrália, em função da relação entre a cobertura condutora e a frequência relativamente alta do sistema (20 kHz) e da baixa capacidade de penetração. Outro inconveniente que se soma é, muitas vezes, a presença de grafita associada a sulfetos maciços em terrenos do tipo *greenstone belt*, que pode representar um “ruído” geológico, não permitindo sua diferenciação com os sulfetos (Palacky & West 1996). No PRV o método VLF não obteve resultados satisfatórios em função do baixo sinal recebido das três estações transmissoras (de 15 a 30 kHz), além da presença de ruídos aleatórios (BRASIL 1993).

3.6 - ESTUDOS GEOFÍSICOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

No Quadrilátero Ferrífero foram realizados dois grandes projetos de levantamento aerogeofísico. O primeiro foi viabilizado em 1971, através do CGBA, no qual o DNPM contratou a CPRM e a PRAKLA-SEISMOS GMBH (Alemanha) para realizar um levantamento aeromagnético (DNPM 1978). Como produtos finais de processamento, foram obtidos mapas de contorno da intensidade magnética total (escalas 1:100.000, 1:500.000 e 1:1.000.000) e fitas magnéticas. Como produto final de interpretação, ainda foram gerados mapas de interpretação aerogeofísica (escalas 1:100.000 e 1:500.000).

O segundo levantamento foi viabilizado em 1991, a partir da criação do Programa Distritos Mineiros da Divisão de Geologia do Departamento Nacional de Produção Mineral (DIGEO/DNPM), visando integrar informações e realizar estudos de detalhe para definição dos controles dos depósitos minerais mais importantes do país, contribuindo também para a descoberta de novos depósitos (Marini, 1993). A DIGEO/DNPM mudou sua prioridade de varredura geológica sistemática de todo o país para o detalhamento geológico, geofísico e geoquímico de áreas favoráveis, através de projetos integrados com a iniciativa privada. Com base nestes aspectos, foi criado o PRV num dos ambientes geológicos de maior potencialidade para ouro e de pouco conhecimento geológico em relação à complexidade do quadro evolutivo da área. Este projeto consta de um levantamento aerogeofísico de alta resolução (magnetometria, gamaespectrometria, VLF-EM e EM) em grande parte do Quadrilátero Ferrífero, realizado entre os anos de 1991/92, abrangendo o SGRV. Maiores detalhes sobre estes projetos podem ser encontrados no Capítulo 4.

Com base nos dados destes projetos, alguns trabalhos foram desenvolvidos e serão discutidos a seguir.

Numa área próxima, localizada entre 18° - 21°S e entre 40° - 45°W, correspondente ao Estado de Minas Gerais, Corrado *et al.* (1979) isolaram anomalias superiores com comprimento de onda superior a 80 km, através de filtragem numérica de dados obtidos pelo levantamento aeromagnético efetuado pela PRAKLA para o projeto CGBA (DNPM 1978). Segundo os autores, estas anomalias são correlacionáveis à morfologia do limite inferior da camada crustal magnetizada, representado pela temperatura de Curie dos minerais ferromagnéticos presentes nas rochas da crosta superior. A determinação da morfologia da temperatura de Curie foi efetuada por meio de técnicas de modelagem bidimensional. Como resultado, obteve-se um valor de 22 a 27 km de profundidade para a temperatura de Curie, que corresponde à isoterma de 585° C (considerando-se a magnetita como sendo o principal mineral magnético).

Padilha (1983) realizou a modelagem de diversas formações ferríferas a partir da interpretação de dados aeromagnéticos (CGBA) do Quadrilátero Ferrífero. Em função da complexidade das anomalias magnéticas desta região, associada à alta

concentração de minerais ferrimagnéticos, foram aplicadas diversas técnicas. Foram efetuadas separações (campos regional e local) e inversões (lineares e não lineares) para a modelagem quantitativa dos corpos geradores de anomalias. Conforme consta nos resultados, de um modo geral, as magnetizações concentraram-se no intervalo entre 100 a 500 nT. Análises efetuadas em amostras da região de Itabira demonstraram a importância da magnetização remanescente neste local. Nos outros casos (sinclinais de Ouro Fino e Gandarela) observou-se apenas a presença de uma magnetização induzida.

Ainda segundo Padilha (1983), a magnetização remanescente identificada em Itabira pode ter duas hipóteses:

- indicação de uma maior alteração nas rochas a ela associadas;
- influência das grandes deformações ocorridas na área, que teriam causado mudanças nas direções originais da magnetização remanescente, alinhando-as ou não com a direção da magnetização induzida.

Tavares (1998) estudou a evolução estrutural e potencialidades auríferas na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero (Folha de Caeté) com base no processamento e integração dos dados magnetométricos e gama-espectrométricos do PRV, geológicos e estruturais. Filtros de primeira derivada (magnetometria e gamaespectrometria) realçaram anomalias associadas a corpos de rochas ultramáficas e formações ferríferas (magnetometria), e zonas de alteração hidrotermal, respectivamente. Além disso, estes resultados serviram de suporte para a delimitação e mapeamento da distribuição espacial das rochas metavulcano-sedimentares e de zonas de cisalhamento.

A partir dos dados aerogeofísicos (magnetometria, gamaespectrometria, eletromagnetometria) do PRV, Silva (1999) desenvolveu uma técnica de mapeamento por meio de modelos de razão de probabilidade. Os resultados obtidos foram aplicados na estimativa da distribuição e das diferentes assinaturas dos depósitos auríferos hospedados no GBRV. Segundo a autora, sob o ponto de vista regional, os modelos de previsão geofísica foram convincentes na definição da maioria das rochas hospedeiras. Além disso, os modelos previsionais detalhados gerados para diferentes ambientes mineralizados definiram novas áreas-alvo.

CAPÍTULO 4 - CARACTERÍSTICAS DA BASE DE DADOS DA ÁREA INVESTIGADA

4.1 - INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero possui um grande acervo de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos, de sensoriamento remoto, topográficos, estruturais, geocronológicos, entre outros, que vem subsidiando o entendimento da evolução de seus terrenos. No presente trabalho, a abordagem de investigação foi concentrada no uso dos dados de alta resolução do PRV (Marini 1991), auxiliada pelos dados aeromagnéticos do CGBA (DNPM 1974) que foram utilizados para melhorar o entendimento das anomalias de natureza regional que se estendem para dentro dos domínios da área de estudo. Além destes, foram utilizados dados geológicos e geomorfométricos correspondentes à área de estudo e adjacências.

4.2 - PROJETO RIO DAS VELHAS

O PRV gerou uma base de dados aerogeofísicos e geológicos para os domínios do GBRV. Os dados aerogeofísicos consistem dos levantamentos magnetométrico, gamaespectrométrico e eletromagnéticos ativo (*Helicopter Eletromagnetics* - HEM) e passivo (*Very Low Frequency* - VLF) organizados em meio digital. Os dados geológicos constam de informações geoquímicas, petrográficas e estruturais reunidos em relatórios e mapas. Parte desta base de dados foi utilizada na presente pesquisa e será descrita a seguir.

4.2.1 - DADOS AEROGEOFÍSICOS

O PRV empregou um sistema de aquisição de dados com multi-sensores configurado para os levantamentos magnético, gama-espectrométrico, VLF e HEM. A plataforma aerogeofísica utilizada constou de um helicóptero Bell-212, prefixo PT-HKV próprio para uso em topografia irregular, que manteve uma altura média de voo de 60 metros. A velocidade manteve-se entre 70 a 110 km/h, observando um espaçamento entre linhas de voo de 250 m e perfazendo um total de aproximadamente 1700 km² de

área levantada. Os sistemas de registro de sinais envolveram os seguintes equipamentos e especificações:

- Sistema HEM: modelo Aerodat-5 com um sistema operante em cinco bobinas, três HCP - horizontais coplanares (operando nas frequências de 500, 4175 e 33000 Hz) e duas VCP- verticais coplanares (nas frequências de 935 e 4600 Hz), rebocado a uma distância de 30 m da aeronave;
- Magnetômetro Aerodat/IFG acoplado a um sensor de bombardeamento ótico de vapor de hélio, com sensibilidade limite de 0,01 nT e rebocado pelo mesmo sistema HEM a 15 metros da aeronave;
- Sistema VLF HERZ TOTEM-2^A afastado a 15 metros da aeronave;
- Gamaespectrômetro EXPLORANIUM, modelo GR-820 de 256 espectrais, associado a um detector EXPLORANIUM, modelo GPX-1024, com volume total de 1024 polegadas cúbicas de NaI, instalado a bordo da aeronave.

O controle de navegação e aquisição foi feito a partir de um sistema de posicionamento global com receptores a bordo da aeronave (GPS TRIMBLE, modelo TANS II) e em estações fixas (GPS TRIMBLE, modelo PATHFINDER). Para controlar a altura foi utilizado um radar altimétrico KING, modelo KRA-10 de precisão de 1%.

A monitoração da variação diurna do campo magnético foi efetuada com medidas a cada 1s por um magnetômetro terrestre com sensor de prótons GEOMETRICS, modelo G-803. O sensor foi acoplado a um registrador analógico HEWLETT-PACKARD, modelo HP-7155B e a um coletor de dados digitais XPTO.

O sistema VLF utilizou os sinais das estações de rádio de Annapolis-EUA (NSS - 27,4 kHz), Rugby-Inglaterra (GBR - 16,0 kHz) e Chateaux Roux-França (FUO - 15,1 kHz). As medições de VLF foram realizadas com uma taxa de repetição de 0,2 s, consistindo das componentes total e quadratura, (entre 15 a 30 kHz). Os perfis de vôo foram distribuídos em 4 blocos independentes, observando um posicionamento perpendicular à direção preferencial das rochas dos grupos Nova Lima e Maquiné. A Tabela 4.1 apresenta as direções de linhas medidas e de controle de vôo para os quatro blocos levantados.

Tabela 4.1 – Relação entre blocos levantados e direção das linhas vôo (Brasil 1993).

BLOCO	DIREÇÃO DAS LINHAS DE VÔO	
	LINHA DE MEDIDA	LINHA DE CONTROLE
I	N40°E	N50°W
II*	N50°E	N40°W
III*	N50°E	N40°W
IV	N40°W	N40°E

* utilizados para o presente trabalho

A Figura 4.1 apresenta o mapa de localização do levantamento aerogeofísico e seu posicionamento em relação às direções principais das unidades do *Greenstone-Belt* Rio das Velhas, com destaque para a área investigada (bloco II e parte do bloco III).

A seguir, apresentam-se os parâmetros complementares adotados neste levantamento.

Espaçamento das linhas de vôo:

Tipo de Linha de vôo	Espaçamento (m)
Linha medida	250
Linha de controle	5000

Altura dos sensores:

Método	Altura dos sensores (m)
HEM	60
Magnetômetro	45
VLF	45
Gamaespectrômetro	30

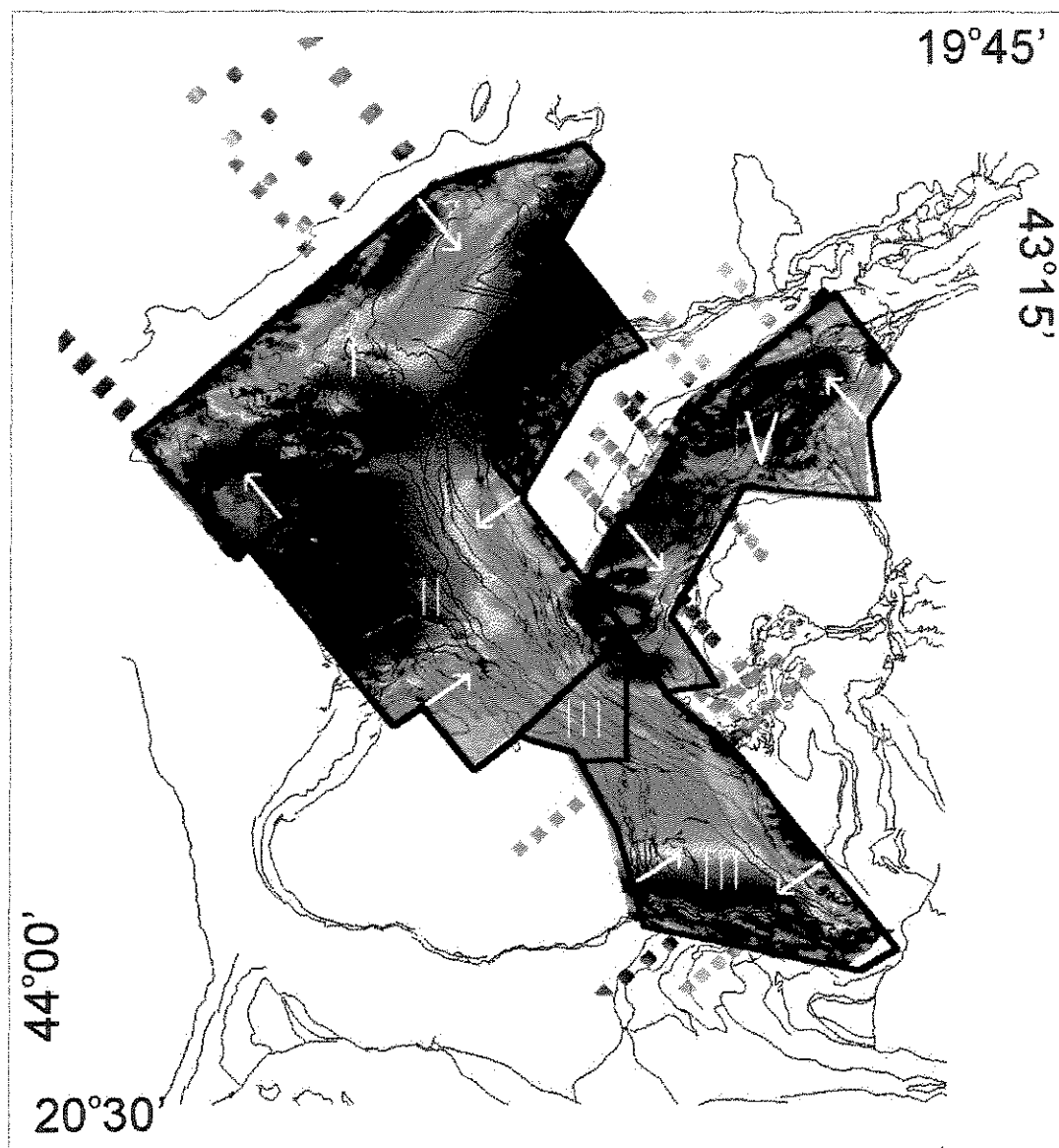


Figura 4.1 - Mapa de localização do levantamento aerogeofísico do Projeto Rio das Velhas (contorno em preto dos blocos I a IV) e da direção das linhas de vôo (setas brancas) em relação às direções principais das unidades do *Greenstone-Belt* Rio das Velhas (contorno em máscara semi-transparente). A imagem de campo de intensidade magnética total foi utilizada como base para efeito de melhor visualização.

Taxa média de amostragem:

Método	Taxa de amostragem (leituras/s)	Distância entre medidas (m)
HEM	5	5
Magnetometria	5	5
VLF	5	5
Gama-espectrometria	1	25

Velocidade de voo:

- 70 a 110 km/h

Volume do detector Gama-espectrométrico:

- 1024 polegadas cúbicas

Configuração do Eletromagnetômetro:

- três bobinas coplanares com 500, 4.175 e 33000 Hz
- duas bobinas coaxiais com 935 e 4600 Hz
- afastamento (transmissor/receptor) = 7 m.

Sensibilidade do magnetômetro:

- 0.01 nT.

Como resultado, foram obtidos dados aeromagnéticos de intensidade de campo total; dados gama-espectrométricos de contagem total (CT), potássio (K) e dos equivalentes de tório (Th) e urânio (U) registrados em contagens por segundo (cps); dados eletromagnéticos de VLF (%) e HEM (ppm). Foram também calculados os dados de resistividade aparente a partir dos valores de HEM. A Tabela 4.2 apresenta a distribuição dos dados dos arquivos finais gerados.

Fases de controle durante a aquisição de dados:

- testes geofísicos (verificação e calibração do gamaespectrômetro, análise de repetibilidade de dados, medições da radiação atmosférica, atenuação da radiação na atmosfera, calibração do sensor eletromagnético),
- pré-processamento de campo (verificação e correção preliminares dos resultados registrados)
- avaliação estatística do levantamento.

Tabela 4.2- Distribuição dos dados nos arquivos finais (CPRM 1993).

INFORMAÇÃO / CANAL	COMPR. (BYTES)	REPETIÇÕES P/	MULTIPL.	OBSERVAÇÕES
Número da Linha	8	1	—	—
Número do Vôo	3	1	—	—
Data do Vôo	6	1	—	AA MM DD
Hora de Amostragem	6	1	—	HH MM SS
Coordenada Leste – UTM	8	1	1	X, em metros
Coordenada Norte – UTM	8	1	1	Y, em metros
Meridiano Central – UTM	3	1	—	—
Baroaltímetro	5	5	10	Altitude (m)
Radar Altímetro	6	5	10	Altura de Vôo (m)
Radar Altímetro Laser	5	5	1	Altura do “Bird” (m)
Espectrômetro – CT	5	1	1	Contagem Total (CPS)
Espectrômetro – K	5	1	1	Potássio (CPS)
Espectrômetro – U	5	1	1	Urânio (CPS)
Espectrômetro – Th	5	1	1	Tório (CPS)
Magnetômetro – Campo Total	8	5	1000	Intensidade Total (nT)
VLF – Componente Total (L)	5	5	10	Longitudinal Campo Total (%)
VLF – Componente Quadratura (L)	5	5	10	Longitudinal Quadratura (%)
VLF – Componente Total (O)	5	5	10	Ortogonal Campo Total (%)
VLF – Componente Quadratura (O)	5	5	10	Ortogonal Quadratura (%)
VLF – Componente Total Final (L)	5	5	10	Longitudinal Total Final (%)
EM – Coaxial – F1	6	5	10	EM 935Hz – Fase (ppm)
EM – Coaxial – Q1	6	5	10	EM 935Hz – Quadrat. (ppm)
EM – Coaxial – F2	6	5	10	EM 4600Hz – Fase (ppm)
EM – Coaxial – Q2	6	5	10	EM 4600Hz – Quadrat. (ppm)
EM – Coplanar – F1	6	5	10	EM 500Hz – Fase (ppm)
EM – Coplanar – Q1	6	5	10	EM 500Hz – Quadrat. (ppm)
EM – Coplanar – F2	6	5	10	EM 4175Hz – Fase (ppm)
EM – Coplanar – Q2	6	5	10	EM 4175Hz – Quadrat. (ppm)
EM – Coplanar – F3	6	5	10	EM 33000Hz – Fase (ppm)
EM – Coplanar – Q3	6	5	10	EM 33000Hz – Quadrat. (ppm)
Resistividade Baixa (CX)	5	5	1000	Coaxial – 935Hz (log ohm.m)
Resistividade Média (CP)	5	5	1000	Coplanar – 4175Hz (log ohm.m)
Resistividade Alta (CP)	5	5	1000	Coplanar – 33000Hz (log ohm.m)

NOTA: Gravação em fita magnética em ASC II, de 9 trilhas e 1600bpi, “no label”, com registros lógicos de 682 bytes e blocos de 20.460 bytes.

Compilação dos dados:

- Magnetometria: remoção da variação magnética diurna e nivelamento magnético das linhas de vôo e de controle;
- Gamaespectrometria: remoção do *background* atmosférico, correção do efeito de espalhamento Compton, correção altimétrica e nivelamento radiométrico;
- Eletromagnetometria: conversão de milivolts para ppm; redução de *spikes* e efeitos espúrios; filtragem seletiva para eliminar efeitos dos campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de alta tensão; determinação do nível de base e seleção de anomalias);
- VLF-EM: nivelamento dos dados do campo total VLF das estações longitudinal e ortogonal de forma a identificar respostas de 0% nas regiões não anômalas.

Os resultados obtidos foram gravados em fitas magnéticas de 9 trilhas e 1600 bpi, no formato ASCII, em registros lógicos de 682 bytes e blocos de 20460 registros. Os dados estão organizados em 5 arquivos, onde todas as informações foram gravadas a cada segundo, por ordem de aquisição. Para os canais altimétrico, magnético e eletromagnético, cada segundo corresponde a cinco leituras. Maiores detalhes sobre o processamento preliminar dos dados podem ser verificados em BRASIL (1993) e no site <http://www.cprm.gov.br/aero/.3000/aero3000.htm>.

4.2.2 – DADOS GEOLÓGICOS

Como resultado do estudo integrado realizado durante o PRV, foi gerado um conjunto de mapas geológicos correspondentes ao *Greenstone-Belt* Rio das Velhas. Para o presente trabalho foram utilizados os seguintes:

- Mapas geológicos em escala 1:25000:
 - Folha Rio Acima (Feboli & Signorelli 1993a),
 - Folha Gandarela (Silva 1993),
 - Folha Rio de Pedras (Signorelli et al. 1993)
 - Folha Itabirito (Feboli & Signorelli 1993a).
- Mapa geológico integrado em escala 1:100000 (Pinto et al. 1996).

4.3 – CONVÊNIO GEOFÍSICA BRASIL-ALEMANHA (CGBA)

Os dados aeromagnéticos deste projeto foram gerados no período de março de 1971 a setembro de 1972, a partir de um convênio de cooperação científica entre os governos do Brasil e da República Federal da Alemanha. O levantamento foi efetuado pela Companhia PRAKLA-SEISMOS GmbH (Alemanha) e cobriu a quase totalidade do estado de Minas Gerais e parte do Espírito Santo, perfazendo um total de 570000 km² de área (Figura 4.2).

O levantamento foi conduzido a uma altitude barométrica constante, variando em partes isoladas da área em função da topografia entre 800 a 2300 metros. A altura média de vôo adotada foi de 350 metros. Os perfis foram voados na direção E-W, observando um espaçamento entre linhas de vôo de 2 quilômetros e um intervalo de amostragem de 60 metros. Linhas de controle foram voadas na direção N-S com um espaçamento variando entre 14 e 20 km. O sistema de registro constou de um magnetômetro de precessão de prótons G803 da GEOMETRICS (sensibilidade de +- 1 nT), com um sensor rebocado por um cabo de 25 m de comprimento (*bird*) numa aeronave Aerocommander.

Em 1995 foi confeccionada uma malha aeromagnética correspondente às 219 folhas voadas neste projeto, através de um Convênio Técnico-Científico entre a CPRM e a empresa canadense de consultoria em geofísica, Paterson, Grant & Watson Limited (PGW). Este arquivo foi gerado a partir da digitalização dos mapas de contornos magnéticos na escala 1:100.000 e, posteriormente, reduzidos do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) sendo que as coordenadas X (leste) e Y (norte) dos pontos referem-se à Projeção Equatorial de Mercator (*Equatorial Mercator Projection* - EM) usando o esferóide de Clark (1880).

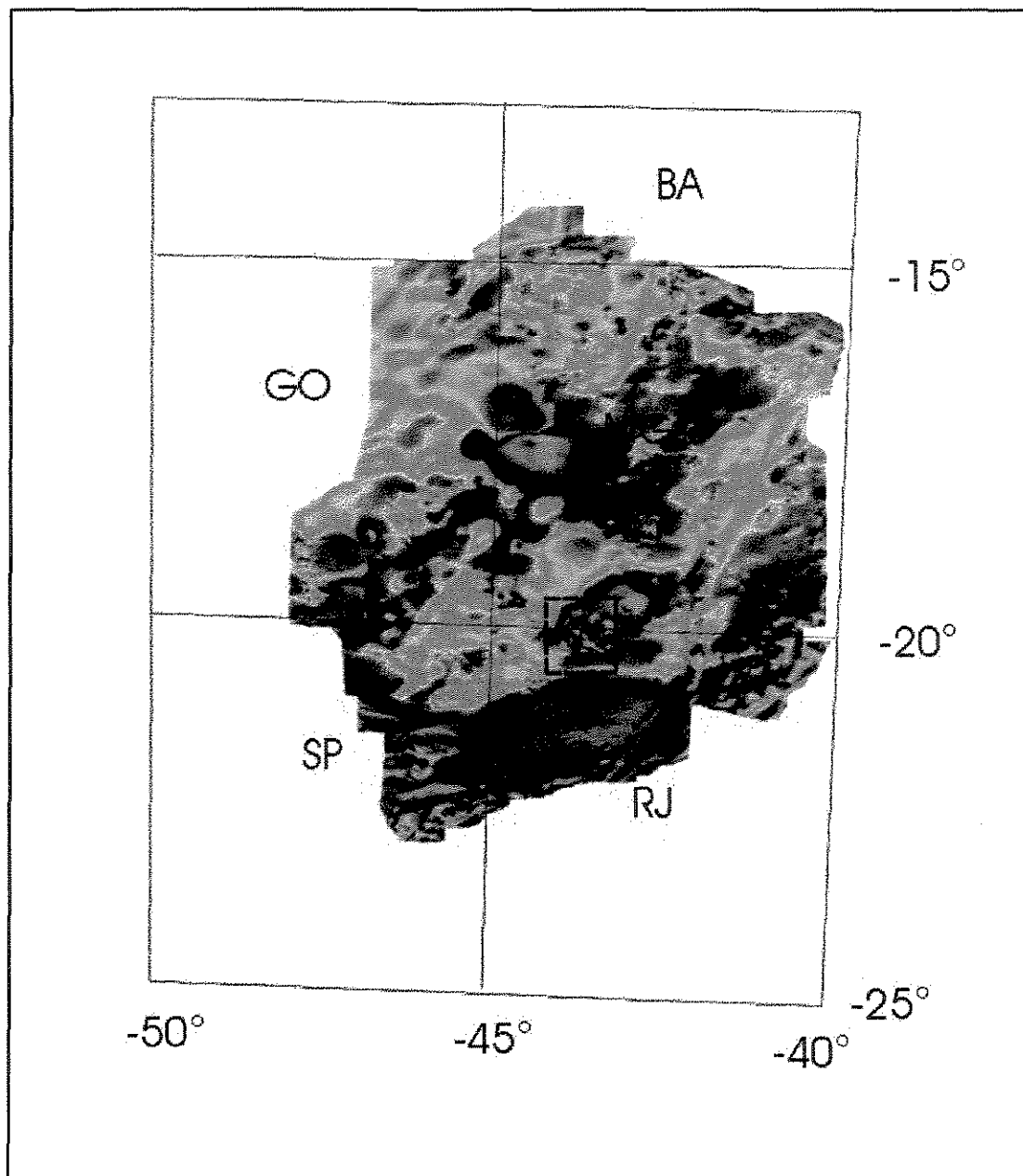


Figura 4.2 – Mapa de localização do levantamento aeromagnético (imagem de intensidade do campo magnético total) do Projeto Convênio Geofísica Brasil-Alemanha (PCGBA), com detalhe em tracejado mostrando o Quadrilátero Ferrífero, região investigada.

Em função das diferentes alturas barométricas utilizadas nas áreas levantadas, assim como as variações topográficas, os dados magnéticos digitalizados foram nivelados e, posteriormente, continuados para cima na altitude de 1 km e organizados em uma malha com célula de 1 km. Maiores detalhes podem ser encontrados no *site* <http://www.cprm.gov.br/aero/1000/aero1000.htm> e em DNPM (1974) e CPRM (1995).

4.4 - BASE DE DADOS GEOMORFOMÉTRICOS

Foram utilizadas cartas topográficas digitais confeccionadas pela empresa de telecomunicações de Minas Gerais S.A. (TELEMAR) correspondentes às folhas de Acuruí e Rio Acima (base 1:100.000). Cada carta topográfica é representada por um conjunto de arquivos, onde cada tema presente na carta corresponde a um grupo de arquivos com informações referentes às curvas de nível, pontos culminantes, localidades, rodovias, ferrovias, aeroportos e hidrografia, registrados em coordenadas *Universal Transversa Mercator* (UTM). Cada elemento geográfico corresponde a um ou mais registros dentro do arquivo respectivo. Com exceção de pontos culminantes, todos são representados por uma polilinha aberta ou fechada.

Cartas topográficas na escala 1:25.000 em cópias impressas para apoio de campo, confeccionadas em 1977 pelo consórcio Cruzeiro, Terrafoto e Prospec:

Folha Rio Acima (SF.23-X-A-III-1-NE):

- coordenadas 20°07'30"/43°52'30" e 20°00'00" e 43°37'30"
- declinação magnética registrada em 1993 de 21° 00'.

Folha Gandarela (SF.23-X-A-III-2-NO):

- coordenadas 20°07'30"/43°45'00" e 20°07'30" e 43°07'30"
- declinação magnética registrada em 1993 de 21°00'.

Folha Rio de Pedras (SF.23-X-A-III-2-SO):

- coordenadas 20°15'00"/43°45'00" e 20°07'30" e 43°37'30"
- declinação magnética registrada em 1995 de 21°.

Folha Itabirito (SF.23-X-A-III-1-SE):

- coordenadas 20°15'00"/43°52'30" e 20°07'30" e 43°07'30".
- declinação magnética registrada em 1995 de 21° 24'.

4.5 – DADOS GEOLÓGICOS

- Mapa geológico em escala 1:50000 (O'Rourke 1957);
- Mapas geológicos em escala 1:25000 correspondentes às folhas Rio Acima, Gandarela, Rio de Pedras e Itabirito (DNPM-USGS) (Dorr 1969);
- Mapa geológico em escala 1:150000 correspondente ao Quadrilátero Ferrífero (DNPM-USGS) (Dorr 1969).

CAPÍTULO 5 - TRATAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Os métodos adotados no tratamento digital dos dados aerogeofísicos foram baseados em técnicas utilizadas pelo *Geological Survey of Canada* (Hood 1977, Palacky 1986), pela *World Geoscience Corporation (WGC)* (House *et al.* 1999) e pelo *Australian Geological Survey Organization (AGSO)* (Gunn 1998). No que se refere à literatura australiana, vários trabalhos têm sido realizados na exploração aerogeofísica de alta resolução em terrenos do tipo *greenstone-belt* (Isles *et al.* 1989, Jaques *et al.* 1997, Luyendyk 1997, Minty *et al.* 1997, Miligan & Gunn 1997, Gunn *et al.* 1997, Dickson & Scott 1997, Wilford *et al.* 1997, Gunn 1998, Gunn *et al.* 1998, House *et al.* 1999, entre outros).

Como apoio às técnicas aplicadas, foram utilizadas as fundamentações teóricas pesquisadas em diversos textos de referência básica, como Telford *et al.* (1990), Dobrin & Savit (1988), Sharma (1986), Nabighian (1988a e 1988b), Luiz & Silva (1995) e Blakely (1996).

O objetivo inicial desta etapa foi transformar os dados originais em arquivos temáticos de acordo com as variáveis geofísicas trabalhadas, sem afetar a sua integridade a partir de estratégias de processamento inadequadas. A partir desta etapa, foi possível realizar uma análise preliminar do conteúdo geofísico dos arquivos resultantes, assim como planejar as fases de apresentação e realce dos dados. A seguir serão descritas as técnicas de tratamento utilizadas. Uma discussão sobre cada etapa deste capítulo será apresentada nos capítulos subseqüentes.

5.2 - PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Foi adotado no presente trabalho o termo “pré-processamento” para definir os procedimentos adotados nas fases de aquisição e compilação dos dados aerogeofísicos do PRV. Uma descrição detalhada destas etapas pode ser encontrada nos relatórios dos PRV (CPRM 1993) e CGBA (DNPM 1974).

5.3 - PROCESSAMENTO DOS DADOS

Este tópico apresenta uma síntese das técnicas de processamento aplicadas aos dados geofísicos. Fundamentos teóricos sobre essas técnicas e detalhes a respeito de sua implementação computacional são apresentados nos capítulos 7 e 8 de resultados.

5.3.1 - GERAÇÃO DOS ARQUIVOS TEMÁTICOS

Os dados originais dos levantamentos aerogeofísicos foram convertidos em arquivos temáticos compatíveis com os programas de processamento utilizados na interpretação e integração de dados. A conversão foi baseada na análise da distribuição das informações nos arquivos originais do levantamento, onde cada tipo de dado foi individualizado através da aplicação de uma rotina de programas em linguagem FORTRAN, de acordo com os diferentes intervalos de amostragem e outras especificações como espaçamento entre linhas de vôo, posicionamento da variável, etc (Tabela 4.2).

Posteriormente, cada arquivo teve suas linhas de vôo recuperadas e foi analisado a partir de uma análise visual e estatística. Nesta etapa, feições indesejáveis tipo *spikes* e *dummies* foram removidas através da aplicação de técnicas de interpolação e remoção de componentes de alta frequência ao longo de linhas de vôo individualizadas.

5.3.2 - REMOÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO REGIONAL DA TERRA

Esta etapa abrange a subtração dos valores do campo regional terrestre dos dados magnéticos com base no modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) (IAGA 1996). Os valores subtraídos dependem das coordenadas geográficas do ponto de medida e da data do levantamento. Sua aplicação objetiva remover o

campo geomagnético de referência para, desta maneira, permanecerem as anomalias magnéticas associadas a heterogeneidades da crosta terrestre.

O cálculo do campo geomagnético de referência a partir do modelo IGRF está implementado na maioria dos *softwares* de processamento de dados magnéticos e, de uma forma geral, é executado em duas etapas:

- cálculo do campo geomagnético de referência em cada ponto de medida;
- subtração dos valores calculados nos valores medidos.

O resíduo assim obtido define o valor da anomalia magnética no ponto de medida. O campo geomagnético de referência é calculado a partir da avaliação de um modelo matemático expresso por uma expansão em série em termos de harmônicos esféricos.

5.3.3 - CONVERSÃO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Os dados gamaespectrométricos são obtidos em contagens por unidade de tempo, valores estes que dependem da concentração de radioelementos na camada superficial do solo (ou rochas aflorantes), tipo de equipamento utilizado para aquisição (volume do cristal, eficiência do detector e largura das janelas) e altura de vôo (Minty 1997). A conversão destas taxas de contagem para teores médios de superfície fornece estimativas das concentrações de K, U e Th, permitindo a interpretação geológica da área investigada e comparação com diferentes levantamentos gamaespectrométricos.

O procedimento para conversão é relativamente simples e, de uma forma geral, consta da divisão de cada uma das contagens dos três canais pelos seus respectivos coeficientes de sensibilidade. Estes coeficientes são calculados com base em informações de espectrômetros portáteis calibrados que determinam a concentração de K, U e Th em superfície. O K é determinado diretamente, a partir de contagens no canal do ^{40}K e suas concentrações expressas em porcentagem (%). A determinação de U e Th se dá na forma indireta, obtendo-se resultados em partes por milhão (ppm) de seus equivalentes (eU e eTh).

Vale mencionar que não há registro sobre as rotinas de calibração nos relatórios técnicos dos dados gamaespectrométricos do PRV. Como alternativa, Amaral & Pascholati (1998) realizaram as conversões de contagens por segundo (cps) para ppm e %, aplicando técnicas de regressão geométrica baseadas em coeficientes calculados a partir de informações referentes a dados de calibração de espectrômetros empregados em diversos levantamentos geofísicos existentes. Desta forma, os autores mencionados obtiveram valores aproximados de sensibilidade dos radioelementos. Detalhes sobre técnicas de calibração gamaespectrométricas podem ser encontrados, por exemplo, em Mares (1984).

5.3.4 - GERAÇÃO DAS MALHAS REGULARES

Nesta etapa, os dados aerogeofísicos foram interpolados em malhas regulares objetivando prepará-los para posteriores análises estatísticas e transformações matemáticas operadas no domínio da frequência.

Diversos métodos de interpolação podem ser usados na geração de malhas. O método adequado deve ser escolhido dependendo da variável geofísica trabalhada, do tipo de processamento realizado, do padrão e distribuição da variável analisada, das informações geológico-estruturais, etc (Journel & Huijbregts 1978). Um ponto desfavorável é que a maioria destes algoritmos não permite quantificar a variância do erro associado no cálculo. As malhas assim geradas muitas vezes apresentam suavizações exageradas na superfície interpolada, principalmente em regiões onde há uma expectativa não estacionária de distribuição das variáveis (Armstrong 1998). O resultado pode ser a criação de feições espúrias do tipo “colar de pérolas” ou mesmo o desaparecimento de feições sutis importantes. Estudos sobre o desempenho dos interpoladores existentes e suas aplicações em dados geofísicos podem ser encontrados em Chiles & Guillen (1984), Hu (1995), Remacre & Uzumaki (1996) e Remacre & Braghin (1997).

Nesta etapa, uma análise variográfica experimental dos dados geofísicos caracterizou uma correlação espacial das variáveis presentes, permitindo determinar o método de interpolação para a geração das malhas regulares. Esta análise foi feita com

base na observação dos padrões de distribuição das principais feições geológicas geofísicas da área.

A definição do tamanho da célula da malha regular foi feita com base nos dados magnéticos em função das características deste campo (Telford 1976). Neste caso, foi escolhida uma célula de 30 metros, estabelecido a partir da taxa de amostragem (ver item 4.2.1) e do padrão de variação litológica na direção perpendicular às linhas de vôo. Maiores detalhes sobre teorema de amostragem^{5.1} e análise harmônica^{5.2} aplicadas em dados de campo potencial (gravimétrico e magnético) podem ser encontrados em Blakely (1996).

5.3.5 - MICRONIVELAMENTO DOS DADOS

O desempenho da aplicação de técnicas de processamento digital para a interpretação de dados aerogeofísicos depende da qualidade das correções que objetivam a remoção dos efeitos de desnivelamento entre as linhas de vôo. Este tipo de distorção se manifesta nos mapas de contorno, individualizando linhas isoladas (desniveladas) que estabelecem tendências sem nenhuma correspondência geológica. Em adição, dificulta o reconhecimento das feições existentes e acarreta efeitos deletérios na etapa de processamento que visam o realce das anomalias. O desnivelamento pode aparecer devido à remoção imperfeita das variações temporais, problemas de navegação (altura de vôo), deriva do sensor, etc. Quanto às variações temporais, seus efeitos podem ser subtraídos utilizando linhas de controle ou pela monitoração da variação diurna em estações magnetométricas terrestres, a exemplo do PRV (CPRM 1993). Atualmente, erros de navegação encontram-se minimizados devido ao uso de sistemas globais de posicionamento (GPS) com precisão em torno de 10 m e atualização a cada segundo. Mesmo sendo pequena a quantidade de erros após as remoções convencionais do nível de base e nivelamento, a persistência destes resíduos tende a se amplificar com a aplicação de técnicas de realce e filtragem dos dados (Ferraccioli *et al.* 1998), o que pode comprometer a interpretação.

^{5.1} Teorema de Shanon que postula a preservação de todas as freqüências menores ou iguais à metade da freqüência de amostragem (freqüência de Nyquist).

No que se refere aos dados HEM, há uma dificuldade adicional em obter malhas bem niveladas (Huang & Fraser 1999) devido às mudanças abruptas de resistividade registradas em vôos de baixa altitude sobre áreas de condutividade altamente variável. Além disso, os sistemas que operam no domínio da frequência não podem anular o campo primário para determinar o “nível zero” dos dados de HEM. Este nível refere-se ao registro das componentes em fase e quadratura quando há ausência de um campo secundário. Desta forma, o campo secundário é anulado voando-se em alturas da ordem de 200 ou 300 m. Para o caso do levantamento HEM do PRV (altura do sensor = 30 m), a mudança de temperatura com a altitude pode afetar a separação ou o alinhamento das bobinas transmissora e receptora alterando o nível de zero da fase e da quadratura. Mudanças de, por exemplo, 1 mm na separação entre as bobinas podem acarretar em respostas de 40 ppm no valor de medida. Além disso, mudanças na direção do Sol (sentido de vôo e presença de nuvens) também geram flutuações na temperatura da aeronave (Huang & Fraser 1999), conseqüentemente causando deriva no sensor EM e desnivelando as linhas de vôo.

Nesse contexto, a técnica de processamento denominada micronivelamento assume importância fundamental para a remoção dos erros de desnivelamento, constituindo uma das abordagens de correção mais difundidas. De acordo com Bullock & Isles (1994), o termo micronivelamento refere-se a uma série de abordagens de processamento para minimizar os deslocamentos de nível entre linhas de vôo adjacentes.

Minty (1991) apresenta uma técnica de micronivelamento de dados aeromagnéticos, aplicando métodos de filtragem direcional (ao longo e perpendicular às linhas de vôo) para remover erros residuais com assinatura espectral distinta. Esta técnica é de simples aplicação e pode ser uma alternativa ao nivelamento convencional por linhas de controle que intersectam aquelas do aerolevanteamento. No entanto, nem sempre é possível distinguir os erros de nivelamento, especialmente se as anomalias de origem geológica possuírem a mesma orientação das linhas de vôo.

^{5.2} Decomposição de uma forma de onda em séries de Fourier.

Um procedimento de micronivelamento para dados magnéticos e radiométricos aerotransportados é apresentado por Geosoft (1997). O método consiste na aplicação de um filtro de decorrugação^{5.3} seguido de um filtro direcional, gerando uma malha de erros que é subtraída da malha original.

Huang & Fraser (1999) propõem um método para o nivelamento de dados eletromagnéticos aerotransportados. Neste método, inicialmente emprega-se um procedimento semi-automático que utiliza pseudolinhas de controle para identificar e remover erros de nivelamento ao longo das linhas de vôo. Em seguida, emprega-se uma técnica automática que combina filtros não lineares 1D e 2D para rejeitar os erros remanescentes de curto e longo comprimentos de onda. A técnica semi-automática tem restrições em função de não distinguir erros de nivelamento e feições geológicas com sinal semelhante paralelas às linhas de vôo.

5.3.6 - SIMULAÇÃO DE PROCESSAMENTOS UTILIZANDO DADOS SINTÉTICOS

A utilização de anomalias sintéticas, geradas em computador, para testar técnicas de processamento de dados geofísicos permite reconhecer as situações em que os resultados fornecidos não são satisfatórios. Isto é importante numa situação prática, pois evita que feições espúrias, provenientes de artifícios de processamento, sejam confundidas com feições verdadeiramente geológicas, induzindo, assim, erros graves de interpretação. Neste sentido, as situações geofísicas simuladas neste trabalho buscaram aprimorar o entendimento de problemas reais na área de estudo tais como a presença de anomalias incompletas, interferências de diferentes sinais (baixa e alta frequências), efeitos na redução ao pólo e de processamento usando a amplitude do sinal analítico, entre outras. Os resultados obtidos auxiliaram a avaliação do desempenho de algumas técnicas de processamento, assim como a escolha daquelas mais adequadas, tendo em vista as características dos dados.

As anomalias sintéticas foram geradas a partir de modelos prismáticos na forma de malhas regulares possibilitando a análise em mapas.

^{5.3} Procedimento de filtragem que produz uma malha regular contendo apenas os erros de nivelamento de linhas de vôo.

5.3.7 - MÉTODOS UTILIZADOS PARA A INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

A escolha dos métodos para a interpretação dos dados aerogeofísicos levou em consideração as características do campo magnético da região estudada, assim como seu contexto geológico-estrutural. Tais fatores permitiram estabelecer o padrão normal de anomalia, variações de amplitude, posicionamento, orientação, tipo de magnetização, distribuição espacial, etc. Esta análise preliminar propiciou a seleção de técnicas de realce visando aprimorar a caracterização geofísica da área.

A seguir será apresentada uma síntese das técnicas aplicadas para a interpretação dos dados após a geração das malhas. Uma discussão mais detalhada encontra-se nos resultados apresentados nos capítulos subsequentes.

5.3.7.1 - ESPECTRO DE POTÊNCIA DOS DADOS MAGNÉTICOS

Segundo Bhattacharyya (1966), os valores do campo magnético são geralmente medidos sobre um plano horizontal ou a uma altura fixa da superfície terrestre e podem ser registrados através das variáveis espaciais x e y . Neste caso, representação discreta de uma área amostrada pode ser efetuada de maneira exata por meio das séries de Fourier bidimensionais. Esta idéia partiu, inicialmente, de Alldredge *et al.* (1963), numa análise no domínio da frequência dos valores de campo total ao longo de um perfil magnético em volta da Terra. Foram calculadas as somas quadráticas das amplitudes das diferentes frequências de acordo com a largura do intervalo do comprimento de onda fixo em 10 milhas náuticas em torno de vários comprimentos de onda. O somatório das harmônicas para uma faixa particular representa a energia contida naquela faixa de frequência. Quando plotado em relação ao comprimento de onda das harmônicas, este somatório produz uma distribuição bimodal do espectro de energia devido à existência de fontes em diferentes profundidades.

Bhattacharyya (1966) obteve a solução matemática para o espectro teórico correspondente a um corpo prismático retangular magnetizado uniformemente numa direção arbitrária, vindo a contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas de interpretação de dados de campo potencial no domínio da frequência. Desta forma, a

representação da anomalia no domínio da frequência permitiu vislumbrar a separação dos efeitos das fontes próximas à superfície (comprimento de onda curto) das fontes crustais mais profundas.

Seguindo esta linha, Spector & Grant (1970) propuseram o emprego de modelos estatísticos na análise de espectros de potência. Esta abordagem considera que a esperança matemática do espectro de potência radial médio da anomalia é função da profundidade do topo de fonte. Desta forma, pode-se estimar a profundidade do topo da fonte através da expressão:

$$\text{Log } E(k) = 4\pi hk \quad (5.1)$$

Sendo:

E = espectro de potência médio

H = profundidade média do topo das fontes

K = momento magnético

Na técnica desenvolvida a partir desta teoria, a distribuição das frequências é registrada por segmentos de reta, cujas inclinações estão relacionadas à profundidade (h) das fontes. Detalhes sobre fundamentos da análise harmônica envolvidos nesta etapa encontram-se em Bhattacharyya (1965), Spector (1968), Spector & Grant (1970).

Existem algumas restrições a esta técnica, principalmente no caso de latitudes magnéticas próximas a 20° (Spector & Grant 1970) ou na presença de anomalias não completamente amostradas pela janela de dados. Mesmo assim, seu uso é válido, numa primeira instância, como um guia qualitativo para a identificação de fontes magnéticas em profundidades distintas, assim como para determinação das frequências de corte utilizadas na remoção de ruídos indesejáveis ou no realce de feições de interesse.

5.3.7.2 - FILTRAGENS DOS DADOS MAGNÉTICOS

Após os processos de aquisição, geração das malhas regulares e redução dos dados, os dados magnéticos são tratados com vários filtros para remover ruídos existentes, assim como separar os efeitos de anomalias de baixa e alta frequências. Uma discussão detalhada de cada um dos filtros utilizados, assim como das técnicas de apresentação dos dados encontram-se em Telford *et al.* (1990), Mares (1984), Robinson & Çoruh (1988), Doyle (1990), Luiz & Silva (1995), Milson (1996), Geosoft (1997), Milligan & Gunn 1997.

Filtro de redução ao pólo

A forma de uma anomalia magnética depende da inclinação do campo magnético da Terra. Fora dos pólos magnéticos este campo deixa de ser vertical, fazendo com que as anomalias geradas assumam formas mais complexas em relação às fontes causadoras, o que dificulta o processo de interpretação.

A relação fonte-anomalia nem sempre é óbvia principalmente nas latitudes inferiores a 50° (Vacquier *et al.* 1951). Para simplificar o processo de interpretação é usual aplicar a transformação de redução ao pólo que tem como objetivo obter a anomalia tal como seria no pólo a partir do processamento da anomalia medida em uma latitude qualquer. Para muitos autores, este processo facilita a interpretação dos dados, pois deixa a anomalia mais centrada sobre as fontes magnéticas auxiliando, desta forma, o seu mapeamento.

Para latitudes magnéticas menores que 20°, existentes em grande parte do território brasileiro, esse procedimento começa a apresentar instabilidade, causando efeitos de anisotropia azimutal (Baranov & Naudy 1964, Mantovani & Shukowsky 1983, Silva 1986, Arkani-Hamed 1988, Hansen & Pawlowiski 1989, Mendonça & Silva 1993, MacLeod *et al.* 1993a e 1993b, Keating & Zerbo 1996, Bird *et al.* 1998 e Swain 2000). Além disso, outras restrições podem ser impostas na presença de componentes de magnetização remanescente não coincidentes com o vetor do campo magnético terrestre, uma vez que o processo de redução ao pólo assume que a direção de magnetização é conhecida.

Mantovani & Shukowsky (1983) aplicaram a redução ao pólo em dados aeromagnéticos regionais no estado de Minas Gerais (CGBA), embora alguns alinhamentos na direção NNW tenham surgido em virtude da região se encontrar numa latitude magnética relativamente baixa.

Arkani-Hamed (1988) propôs um método de redução ao pólo diferencial (RPD) para áreas extensas onde as variações de direção são tratadas como direções médias de inclinação do campo geomagnético. Swain (2000) menciona que, apesar da técnica de Arkani-Hamed (1988) apresentar certas vantagens na aplicação em malhas magnéticas regionais, particularmente para baixas latitudes magnéticas, existe dois tipos de problemas com a RPD:

- Dificuldade de implementação do algoritmo devido ao grande tamanho dos bancos de dados, o que restringe a capacidade de processamento em microcomputadores ou pequenas estações de trabalho;
- Em baixas latitudes magnéticas o método torna-se instável, pois as anomalias existentes na direção N-S magnética e os ruídos inerentes ao levantamento são ainda mais amplificados daqueles posicionados em latitudes mais altas.

MacLeod (1993a e 1993b) propõe uma alternativa à instabilidade gerada para baixas latitudes (Arkani-Hamed 1988), a partir de um algoritmo para redução ao pólo diferenciada, introduzindo uma pseudo-inclinação para atenuar os ruídos N-S realçados nas condições onde a inclinação do campo magnético e a razão entre os números de onda^{5.4} são pequenas. Mesmo assim, foram encontrados problemas semelhantes na estabilização destes números de onda, como em Sangihe Island, Indonésia ($I = 45^\circ$) e mesmo em regiões com baixa latitude magnética, como o caso do *Greenstone Belt* de Crixás, Goiás ($I = -10^\circ$). Os mesmos autores mencionam que, mesmo para casos de presença de magnetização remanescente (Sangihe Island), o problema maior está na baixa inclinação magnética. Eles sugerem testes com diferentes valores de correção de amplitude do operador do algoritmo como alternativa, mas ressaltam que há distorção das anomalias.

Swain (2000) discute a causa dos problemas encontrados por MacLeod *et al.* (1993), indicando uma restrição nos procedimentos adotados para mudar a amplitude do filtro sem alterar sua fase durante o processo de centralização das anomalias sobre seus corpos causativos. No entanto, apesar da equação apresentada por MacLeod *et al.* (1993) estabilizar a redução ao pólo, ela altera a fase. Este tipo de comportamento da função de transformação da redução ao pólo é bem discutido em Blakely (1996). Como alternativa, Swain (2000) propõe uma mudança no algoritmo de MacLeod *et al.* (1993b) e testa em dados magnéticos regionais de quase a totalidade do Brasil (1700 Km x 3850 Km), onde há uma grande variação dos valores de inclinação do campo magnético (10° a -30°). Segundo o autor, os resultados não foram ideais em função das distorções de partes do mapa onde a inclinação não é suficientemente baixa.

Foi observado que, a escolha de um valor médio de correção de amplitude também diferenciou o processamento para as variadas inclinações presentes. Em segundo lugar, os dados foram continuados para cima num valor de 10 km, o que, em tese, atenuaria os ruídos presentes prejudicando, contudo, a avaliação. Finalmente, não há informações detalhadas sobre as características e técnicas de tratamento destes dados. Maiores detalhes sobre o comportamento da função de transformação de redução ao pólo para o caso de baixas latitudes magnéticas podem ser encontrados nas análises em espectros de amplitude e fase de dados sintéticos em Blakely (1996) nas páginas 332-335.

No caso do Quadrilátero Ferrífero, a interpretação destas relações torna-se mais difícil em função da possível presença de magnetização remanescente. Interpretações magnetométricas realizadas por Padilha (1983) sugerem remanescências significativas associadas a anomalias isoladas no Distrito de Itabira, ao norte do Quadrilátero Ferrífero. Uma vez quantificada, o autor sugeriu que a remanescência poderia estar associada ao grau de alteração das rochas presentes (Seguin 1971) e/ou às mudanças de direção das estruturas da área, oriundas da história deformacional complexa de toda a região.

^{5.4} vetores unitários v/v ao longo dos eixos horizontais do sistema de coordenadas x/leste e y/norte.

Não há levantamentos de dados de magnetização remanescente na área de estudo, embora tenham sido observados neste trabalho indícios em algumas anomalias rasas na porção SE do Lineamento São Vicente. Além disso, observam-se anomalias regionais com padrão reverso de magnetização induzida nos dados do CGBA, conforme será discutido no Capítulo 7.2.4.

Filtros de continuação para cima

À medida que a profundidade das fontes magnéticas aumenta, a amplitude da anomalia correspondente diminui e a própria anomalia torna-se mais aberta. Na maioria das vezes, estes sinais de baixa frequência são mascarados pelos efeitos de fontes magnéticas mais rasas. Filtros de continuação para cima auxiliam no realce dos sinais devidos às fontes mais profundas, eliminando os efeitos das anomalias de alta frequência. Essa técnica transforma o campo magnético, simulando sua observação em diferentes níveis acima do nível de aquisição dos dados do aerolevantamento.

Filtros passa baixas

Efeitos de falseamento (aliasing)^{5.5} devido ao intervalo de amostragem dos aerolevantamentos podem ser removidos com filtros passa-baixa utilizando-se determinadas frequências de corte selecionadas a partir da análise do espectro de potência dos dados.

Filtros passa altas

O realce de feições magnéticas superficiais e sub-superficiais é um recurso valioso no mapeamento de detalhe, mostrando uma ótima correspondência com a geologia de superfície. A maioria destas técnicas de realce remove a influência das anomalias de fontes mais profundas isolando o conteúdo de alta frequência dos dados. As rotinas mais comuns adotam derivadas verticais de primeira e segunda ordem, derivadas horizontais, controle de ganho automático, entre outros. No entanto, essa filtragem tem o inconveniente de acentuar os ruídos contidos nos dados.

^{5.5} Ambigüidade associada aos processos de discretização ou de subamostragem, que ocorre quando o sinal de entrada contém frequências acima da frequência de Nyquist de saída (Duarte 1997).

Amplitude do sinal analítico

O sinal analítico é obtido a partir das derivadas direcionais (em x, y e z) da anomalia magnética. A amplitude deste sinal exibe um valor máximo sobre os contatos de fontes magnéticas largas (contatos) ou sobre o centro de fontes estreitas (diques). Estas propriedades independem da direção de magnetização e da latitude magnética considerada o que viabiliza sua aplicação na delimitação das fontes magnéticas visando o mapeamento geológico (Blakely 1996). Nabighian (1972 e 1974) aplicou o sinal analítico na interpretação magnética, desenvolvendo um método semi-automático de análise de perfis 2D para estimar a profundidade e posição de fontes.

Este método auxiliou pesquisas semelhantes (Atchuta Rao *et al.* 1981, Thompson 1982, Nelson 1988a), servindo de base para estudos de soluções para corpos tridimensionais (Nabighian 1984, Blakely & Simpson 1986, Nelson 1988b, Reid *et al.* 1990, Wang & Hansen 1990), assim como na caracterização da magnetização total da rocha (Roest *et al.* 1992).

Neste aspecto, as propriedades apresentadas pelo sinal analítico tornam sua aplicação importante em áreas onde há indícios de magnetização remanescente que tornam as anomalias mais distorcidas quanto ao posicionamento das fontes. Alguns autores sugerem sua aplicação a dados obtidos em baixas latitudes magnéticas (Roest & Pilkington 1993, MacLeod *et al.* 1993a, Cordani *et al.* 1997). Pelos mesmos motivos, Milligan & Gunn 1997 e Shuang Qin (1994) chamam atenção para alguns problemas encontrados no uso desta técnica:

- Geralmente, ao invés de picos estreitos sobre os limites das anomalias, observam-se picos difusos com contornos menos claros dos apresentados nos dados originais de intensidade magnética total, provavelmente resultante da sobreposição de anomalias interferentes;

- Os resultados obtidos podem apresentar alguma distorção devido à dificuldade em computar com exatidão as derivadas horizontais de anomalias de menor amplitude com direção perpendicular às linhas de voo (menor frequência de amostragem).

Vale mencionar que para feições do tipo contato, a resposta obtida torna-se semelhante à de uma fonte estreita, causando ambigüidade na interpretação. Esta ambigüidade deve ser resolvida através da análise da anomalia magnética. Detalhes sobre os fundamentos do cálculo do sinal analítico a partir das relações com a transformada de Hilbert podem ser encontrados nos textos de Bracewell (1965) e Blakely (1996).

5.3.8 - MÉTODOS SEMI-QUANTITATIVOS DE INTERPRETAÇÃO DOS DADOS MAGNÉTICOS

A caracterização de fontes magnéticas em profundidade, em termos de sua forma e posicionamento, é de fundamental importância no entendimento do contexto geofísico da área estudada. Atualmente existe uma série de métodos computacionais de modelagem direta capazes de fornecer estimativas detalhadas sobre a profundidade e geometria de fontes magnéticas, além das rotinas convencionais de análise gráfica (Gunn 1997). A seguir serão comentados alguns dos métodos empregados.

Estimativa espectral de profundidades de fontes magnéticas

A interpretação de dados espectrais para estimativa de profundidade média de topo de fontes magnéticas vem sendo utilizada desde os estudos teóricos iniciados por Bhattacharyya (1966). Spector & Grant (1968) mostram que, para um conjunto de fontes prismáticas de profundidade infinita, o espectro radial de energia da anomalia magnética define uma reta cujo gradiente está relacionado à profundidade média dos topos dos prismas. No entanto, Spector & Grant (1975) apontam algumas restrições no uso deste método em função da possível correlação entre os pólos magnéticos dentro da assembléia de anomalias. Exemplos apresentados por Spector (1968) mostram que estas correções podem modificar a estimativa da profundidade na ordem de 50%. Neste caso, Spector (1985) não recomenda o método para estimativas quantitativas sem correções para a largura e a extensão média dos prismas antes da análise. Segundo Gunn (1997), um exemplo prático desta restrição está na interpretação do espectro de potência gerado em terrenos com fontes magnéticas alongadas.

É importante salientar que as profundidades determinadas servem somente para classificar, preliminarmente, as faixas de profundidades em que ocorrem as fontes magnéticas.

Determinação de profundidade pelo sinal analítico

Alguns autores utilizam as propriedades do sinal analítico (ver item 5.6.3) para estimar a profundidade do topo de fontes magnéticas através da regra da “meia largura na meia amplitude”, sob a hipótese de que as anomalias são causadas por contatos com mergulhos variáveis (Roest *et al.* 1992, MacLeod *et al.* 1993b, Shu-Kun *et al.* 1998).

CAPÍTULO 6 - AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS COM BASE EM ESTUDOS DE SIMULAÇÃO UTILIZANDO MODELOS MAGNÉTICOS

6.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma série de testes para simulação do desempenho das técnicas de realce do programa MagmapTM (Geosoft 1997b) utilizadas no processamento dos dados aeromagnéticos do CGBA e PRV. Esses testes são efetuados em anomalias sintéticas, geradas em computador que representam anomalias semelhantes às existentes em campo. Desta forma, os resultados obtidos por processamento podem ser comparados com aqueles calculados diretamente a partir do modelo, permitindo avaliar o desempenho dos métodos empregados e treinar o intérprete para a análise de casos reais, geralmente mais complexos. Além disso, esse tipo de avaliação identifica possíveis situações onde os métodos empregados fornecem resultados indesejáveis, levando a erros de interpretação geológica. Ao mesmo tempo, dá ao intérprete maior segurança nos resultados obtidos com a aplicação em dados reais, na medida que se verifica que, em situações semelhantes, simuladas em computador, os resultados são satisfatórios.

Os testes sintéticos foram realizados a partir do cálculo dos valores teóricos de anomalias magnéticas correspondente a um prisma retangular vertical usando a implementação computacional da equação desenvolvida por Bhattacharyya (1964). Essa equação expressa a anomalia magnética referente a um corpo prismático retangular, vertical, com topo plano, localizado a uma profundidade h abaixo do nível de observação e com magnetização total fazendo um ângulo θ com a direção do campo magnético da Terra. Como a magnitude do campo anômalo é geralmente pequena quando comparada ao campo total, a direção do campo resultante praticamente não varia sobre a área de observação e, portanto, pode ser considerada como coincidente com a direção do campo geomagnético, que é definida pelos cossenos direcionais l , m e n . Considerando α , β e γ as coordenadas de um volume elementar $d\alpha$, $d\beta$ e $d\gamma$ (Figura

6.1) com direção de magnetização definida pelos cossenos diretores L, M e N, temos que a anomalia magnética correspondente é dada por:

$$dF = I_p \frac{\partial^2}{\partial s \partial t} \left(\frac{1}{r} \right) d\alpha d\beta d, \quad (6.1)$$

onde,

I_p = intensidade da magnetização total

$\partial/\partial s$ = derivada na direção da magnetização total

$\partial/\partial t$ = derivada na direção do campo geomagnético

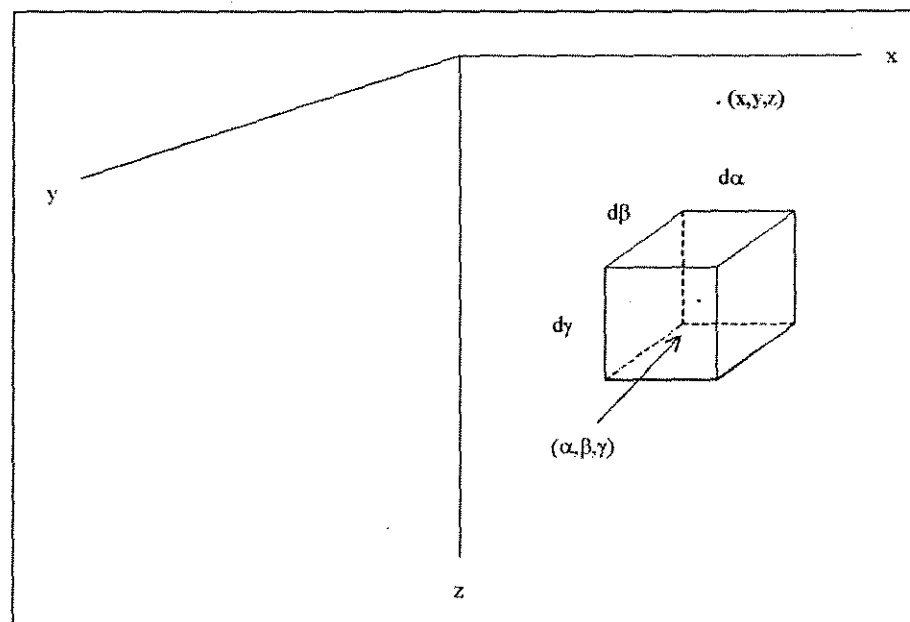


Figura 6.1 - Representação do volume elementar de um prisma e do sistema de coordenadas associado. Fonte: Bhattacharyya (1964).

Integrando a equação 6.1 dentro de um volume prismático se obtém a expressão da anomalia correspondente a esta geometria:

$$\frac{F(x, y, 0)}{I_p} = \left[\frac{\alpha_{23}}{2} \log\left(\frac{\gamma_0 - \alpha_1}{\gamma_0 + \alpha_1}\right) + \frac{\alpha_{13}}{2} \log\left(\frac{\gamma_0 - \beta_1}{\gamma_0 + \beta_1}\right) - \alpha_{12} \log(\gamma_0 + h) \right. \\ \left. - l \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_1 \beta_1}{\alpha_1^2 + \gamma_0 h + h^2}\right) - m \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_1 \beta_1}{\gamma_0^2 + \gamma_0 h - \alpha_1^2}\right) + N \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_1 \beta_1}{\gamma_0 h}\right) \right] \left| \frac{\alpha_\mu}{\alpha_l} \right| \frac{\beta_\mu}{\beta_l}, \quad (6.2)$$

sendo:

$F(x, y, 0)$ = campo anômalo total na posição x , y e $z=0$ (plano de observação)

I_p = intensidade da magnetização

$\alpha\beta\gamma$ = coordenadas do volume elementar do prisma

l, m, n = cossenos direcionais do campo geomagnético

L, M, N = cossenos direcionais da direção de magnetização total

h = profundidade do topo do prisma

α_u = limites superiores de α_1 e β_1

β_u = limites inferiores de α_1 e β_1

$\alpha_l = \alpha - x$

$\beta_l = \beta - y$

A solução para a anomalia magnética dada pela equação 6.2 foi utilizada para simular várias situações geológicas presentes na área, cada uma associada a padrões específicos de anomalias conforme se descreve a seguir.

- Anomalia profunda central: correspondente a um cubo vertical situado no centro da janela de dados (centro do mapa). O prisma tem dimensão horizontal de 10 unidades, profundidade do topo de 5 unidades e espessura de 15 unidades. A magnetização é assumida como sendo apenas do tipo induzido e susceptibilidade magnética de 0.001 SI. Os parâmetros do campo geomagnético foram similares aos da área estudada: intensidade de 23500

nT, inclinação de -28.6° e declinação de 0° . A anomalia magnética foi calculada numa malha regular de 40×40 unidades e amostrada num intervalo de 0.82 unidades.

- Anomalia profunda truncada: prismas com as mesmas características de magnetização e dimensão do caso anterior, porém com prisma posicionado na borda do mapa, gerando uma anomalia truncada em que apenas a parte positiva aparece no interior da janela de dados.
- Três anomalias rasas centrais: prismas com as mesmas características de magnetização, posicionamento e dimensão que no primeiro modelo, só que acompanhado por prismas menores posicionados a uma profundidade de 2 unidades.
- Anomalias centrais com prisma de espessura infinita: um conjunto de 4 anomalias com as mesmas características da anomalia profunda central, só que com prismas de espessuras infinitas e diferentes inclinações de magnetização total de -28.6° , -45° , -90° e 0° .

6.2 - EFEITOS NO ESPECTRO DE POTÊNCIA CAUSADOS POR ANOMALIAS TRUNCADAS

A Figura 6.2 ilustra as distorções do espectro de potência em consequência do truncamento das anomalias presentes. O modelo 1 (Figura 6.2a) representa uma fonte profunda situada no centro da janela de dados. O modelo 2 (Figura 6.2b) tem as mesmas características do anterior, só que posicionado na borda, fazendo com que sua anomalia seja apenas parcialmente amostrada pelo mapa. Para os dois modelos a anomalia magnética foi calculada a uma altura correspondente ao nível do solo ($z=0$). Nos espectros correspondentes a resposta da fonte ensaiada encontra-se posicionada no intervalo de 0,03 a 0,12 números de onda por unidade de distância. No modelo 1 esse intervalo corresponde a uma profundidade média de 8 unidades para o topo da fonte. No modelo 2 esse intervalo corresponde a uma profundidade média de 5,7 unidades para o topo da fonte.

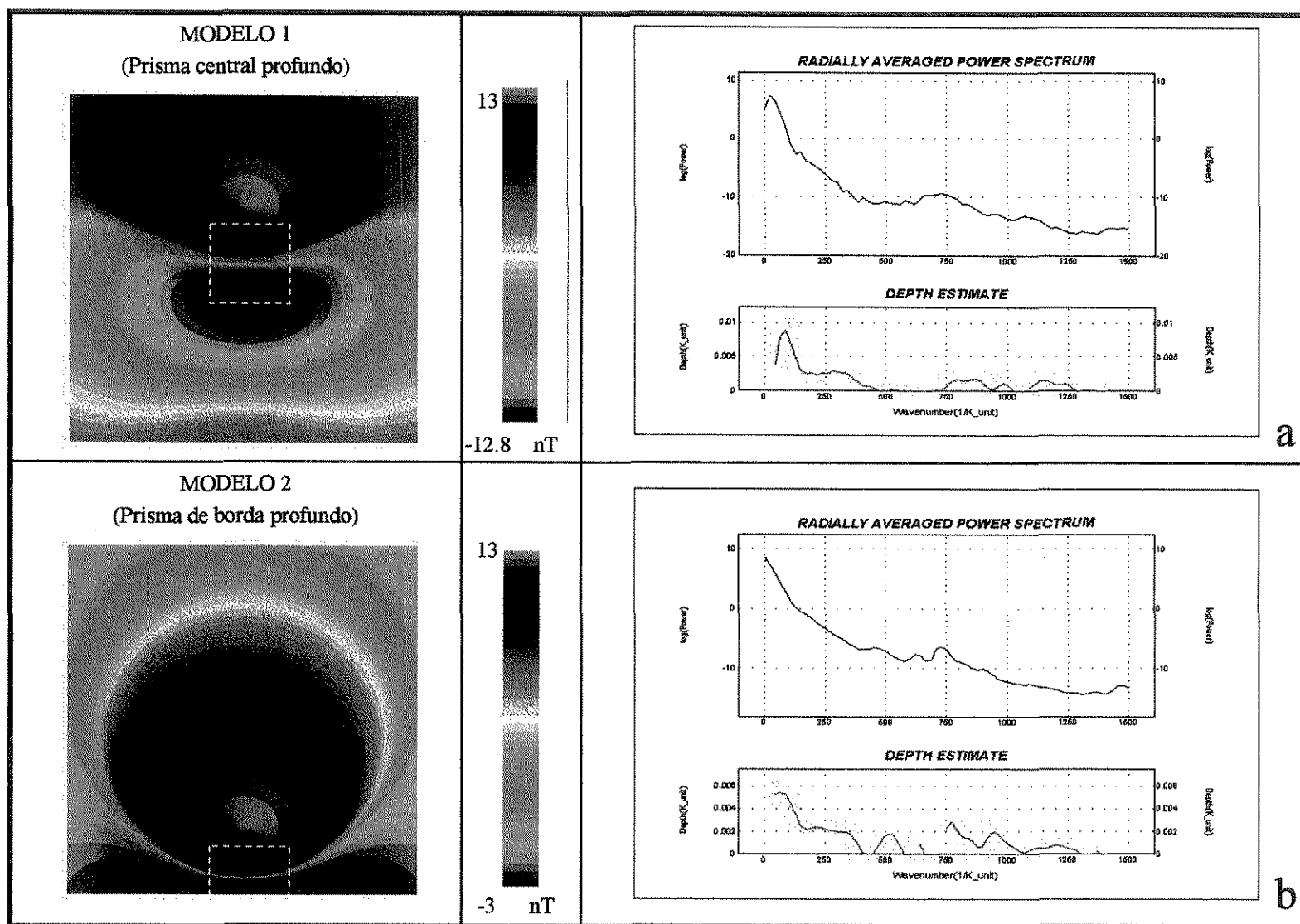


Figura 6.2 - Efeitos no espectro de potência causados por anomalias truncadas. (a) modelo de prisma central profundo, (b) modelo de prisma de borda profundo.

Observa-se que a profundidade média estimada no espectro de potência do modelo 1 (8 unidades) apresenta-se subestimada em relação ao modelo calculado pela equação de Bhattacharyya (10 unidades). Em parte, isto se deve ao fato da anomalia correspondente ao prisma não estar totalmente representada na janela de dados. Já a estimativa de profundidade no espectro do modelo 2 (5,7 unidades) sofre uma distorção bem maior em relação à profundidade verdadeira do prisma (10 unidades), pois a parte negativa do dipolo, praticamente, não está representada. Em situações reais, onde é rara a representação completa das anomalias magnéticas relacionadas às fontes presentes, a aplicação do método de Spector & Grant (1970) sofre restrições, na medida que subestima a interpretação dos resultados obtidos.

6.3 - EFEITOS NO ESPECTRO DE POTÊNCIA CAUSADOS POR ANOMALIAS RASAS

A Figura 6.3 mostra os efeitos no espectro de potência da anomalia sintética correspondente à sobreposição de prismas (descrito no item 6.2) e modelo 3. Esse último foi obtido nas mesmas condições dos anteriores, sendo composto de três prismas rasos com igual espessura.

A Figura 6.3a ilustra o modelo de três fontes rasas, cujo espectro de potência correspondente indica profundidade média de 3.5 unidades no intervalo de 0,12 a 0,36 números de onda/unidade de comprimento. Comparando-se com a profundidade original do modelo de 2 unidades, observa-se que o método superestima os valores calculados. As frequências espaciais com valores acima de 0,36 números de onda/unidade são desprezadas em todos os modelos, uma vez que esse valor representa a frequência de Nyquist. Essa frequência corresponde ao comprimento de onda igual ao inverso do duplo intervalo de amostragem, não sendo possível obter-se informação em comprimentos de onda menores que esse limite. Caso a anomalia contiver conteúdo espectral acima desta frequência, gera-se o fenômeno de falseamento (Blakely 1996).

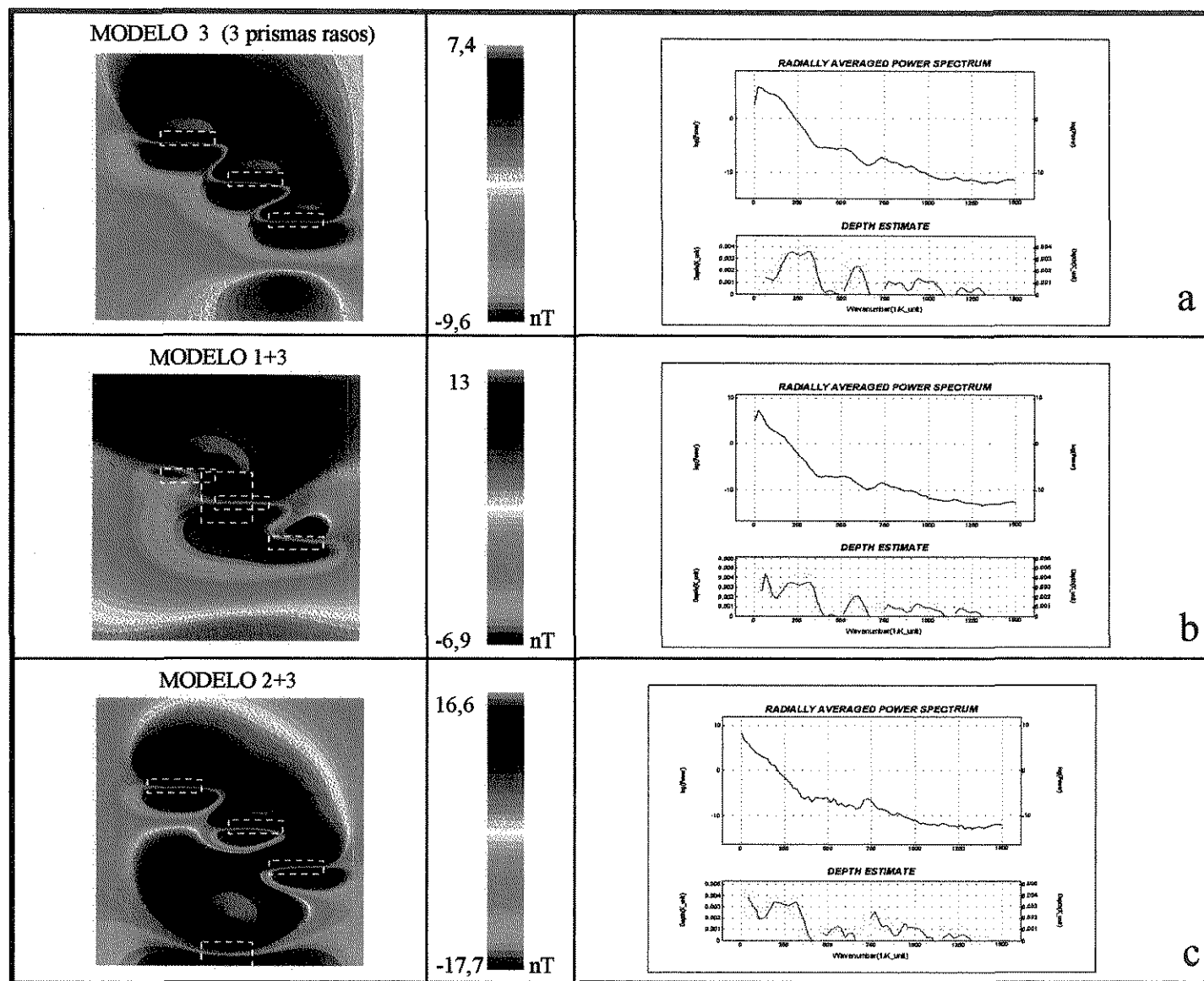


Figura 6.3 - Efeitos no espectro de potência causados por anomalias rasas. (a) modelo de 3 prismas rasos, (b) modelo de prisma profundo central somado a 3 prismas rasos, (c) modelo de prisma de borda profundo somado a 3 prismas rasos.

Cordell & Grauch (1982) e Ricard & Blakely (1988) discutem as limitações na amostragem de dados e seus efeitos no tipo de informação no uso da análise de Fourier de funções contínuas. A Figura 6.3b apresenta a influência das fontes rasas (Figura 6.3a) na presença de fontes profundas centrais na janela de dados (Figura 6.2a). Observa-se que a porção correspondente à contribuição das fontes rasas permaneceu inalterada.

A presença de uma fonte profunda introduziu um conjunto de frequências no intervalo de 0,03 e 0,12 números de onda/unidade, representando uma profundidade média de 4,5 unidades (Figura 6.3b). No entanto, a presença da fonte profunda não alterou o comportamento das frequências espaciais correspondentes às fontes rasas, mantendo as mesmas estimativas de profundidade. Houve apenas uma pequena diminuição na estimativa da profundidade média da fonte profunda e uma atenuação dos ruídos nas frequências acima da frequência de Nyquist.

A possível interferência de fontes profundas externas ou na borda da janela de dados (Figura 6.2b) na determinação da profundidade das fontes rasas (Figura 6.3a) pode ser avaliada pela sobreposição das anomalias do modelo 2 com a do modelo 3 (Figura 6.3c). No espectro da anomalia resultante observa-se que a porção espectral referente à fonte profunda truncada está parcialmente representada, mas mostra um gradiente mais suave em relação ao espectro isolado mostrado na Figura 6.2b. Isto resulta valores de profundidade média em torno de 4 unidades. Estes valores estão subestimados em relação às 5 unidades apresentadas para o modelo 2. Da mesma forma, há uma introdução de ruídos nas frequências maiores.

Os resultados desta simulação não mostram razoável grau de confiabilidade na avaliação qualitativa da profundidade média de fontes rasas. Neste caso, a profundidade verdadeira é duas vezes menor que a estimada sob interferência de fontes profundas e suas frequências não são preservadas no espectro. Para fontes mais profundas, com anomalias truncadas no interior da janela de dados, as estimativas de profundidade também se apresentam incorretas devido a problemas de distorção espectral causado pelo truncamento da anomalia. Em ambas situações verifica-se uma atenuação nos valores dos números de onda o que subestima a profundidade do topo das fontes associadas.

Discussão dos itens 6.2 e 6.3:

A aplicação da transformada de Fourier bidimensional para obter dados quantitativos a partir de dados aeromagnéticos apresenta restrições, à medida que, em termos práticos, efetua-se uma amostragem em intervalos discretos numa área finita de levantamento (janela de dados). Essa restrição pode resultar no truncamento arbitrário de aspectos importantes de anomalias e restringir a representação dos espectros de fontes no domínio da frequência (Ricard & Blakely 1988). Segundo Cordell & Grauch (1982), exceto onde há um comportamento periódico na função que representa o campo magnético anômalo, a utilização da análise discreta de Fourier tende a distorcer os padrões espectrais de origem geológica no cálculo do espectro de potência.

Esse tipo de situação ocorre no levantamento aeromagnético de alta resolução do PRV, cujo objetivo principal foi mapear apenas as unidades do *greenstone*, não dando maior atenção à contribuição das anomalias associadas às fontes regionais presentes em profundidades superiores a 10 km (ver no item 7.2.3), além das formações ferríferas do Super Grupo Minas, existentes nas bordas da área sobrevoada. Como consequência, a janela de dados amostrada neste trabalho (bloco II e parte do bloco III) representa várias anomalias truncadas, comprometendo a estimativa das profundidades de topo das fontes regionais presentes. O mesmo acontece nas estimativas de profundidade das fontes rasas, talvez devido ao efeito de interferências das anomalias.

Desta forma, a estimativa de profundidade de fontes pelo método de Spector & Grant (1970) deve ser utilizada apenas como uma indicação preliminar a respeito da profundidade de topo das fontes mais superficiais, cujas anomalias, de um modo geral, tendem a ser completamente amostradas pela janela de dados da área de estudo. Na estimativa para fontes profundas a restrição aumenta, principalmente, em função da presença de uma anomalia truncada de grande comprimento de onda na porção W da área investigada. Nesse caso, os resultados obtidos servem apenas para se ter uma idéia da profundidade mínima das fontes presentes. A seleção das frequências de corte para filtragens visando a remoção de ruídos deve ser feita com cautela em função do comprometimento das estimativas de profundidade. Neste caso, a escolha da frequência deve ser precedida de testes, juntamente, com uma análise visual dos

resultados obtidos de modo a evitar a remoção de anomalias de significado geológico que aparecem sobrepostas por algumas feições espúrias.

6.4 - TESTES DE APLICABILIDADE DO FILTRO DE REDUÇÃO AO PÓLO

O desempenho do filtro de redução ao pólo implementado no programa MagmapTM (Geosoft 1997b) foi testado através da simulação de várias situações geradas a partir dos modelos sintéticos calculados. A simulação de fontes em meia latitude magnética média foi feita com o mesmo valor da inclinação do campo geomagnético da área de estudo (-28.6°). Nesse caso, foram testados vários fatores de correção de amplitude no algoritmo do MagmapTM, tendo sido selecionado o valor verdadeiro da inclinação, $-28,6^\circ$, pelo seu melhor desempenho (ver discussão no item 5.3.7.2). Para os testes realizados nesta etapa foi utilizada uma declinação de 0° e cada teste foi efetuado conforme a seguinte seqüência:

1º) cálculo da anomalia magnética correspondente a um prisma com magnetização uniforme na mesma direção do campo geomagnético da área em estudo, (inclinação de $-28,6^\circ$);

2º) cálculo da anomalia magnética no pólo correspondente ao mesmo prisma usando, para tanto, os cossenos diretores correspondentes à latitude magnética de 90° na eq. 6.1;

3º) adição de ruído aleatório normal, com amplitude de 1 nT e média zero, na anomalia do primeiro item e aplicação do filtro de redução ao pólo (algoritmo do MagmapTM);

4º) comparação das anomalias obtidas por processamento (item 3) com a calculada diretamente a partir do modelo considerado (item 2).

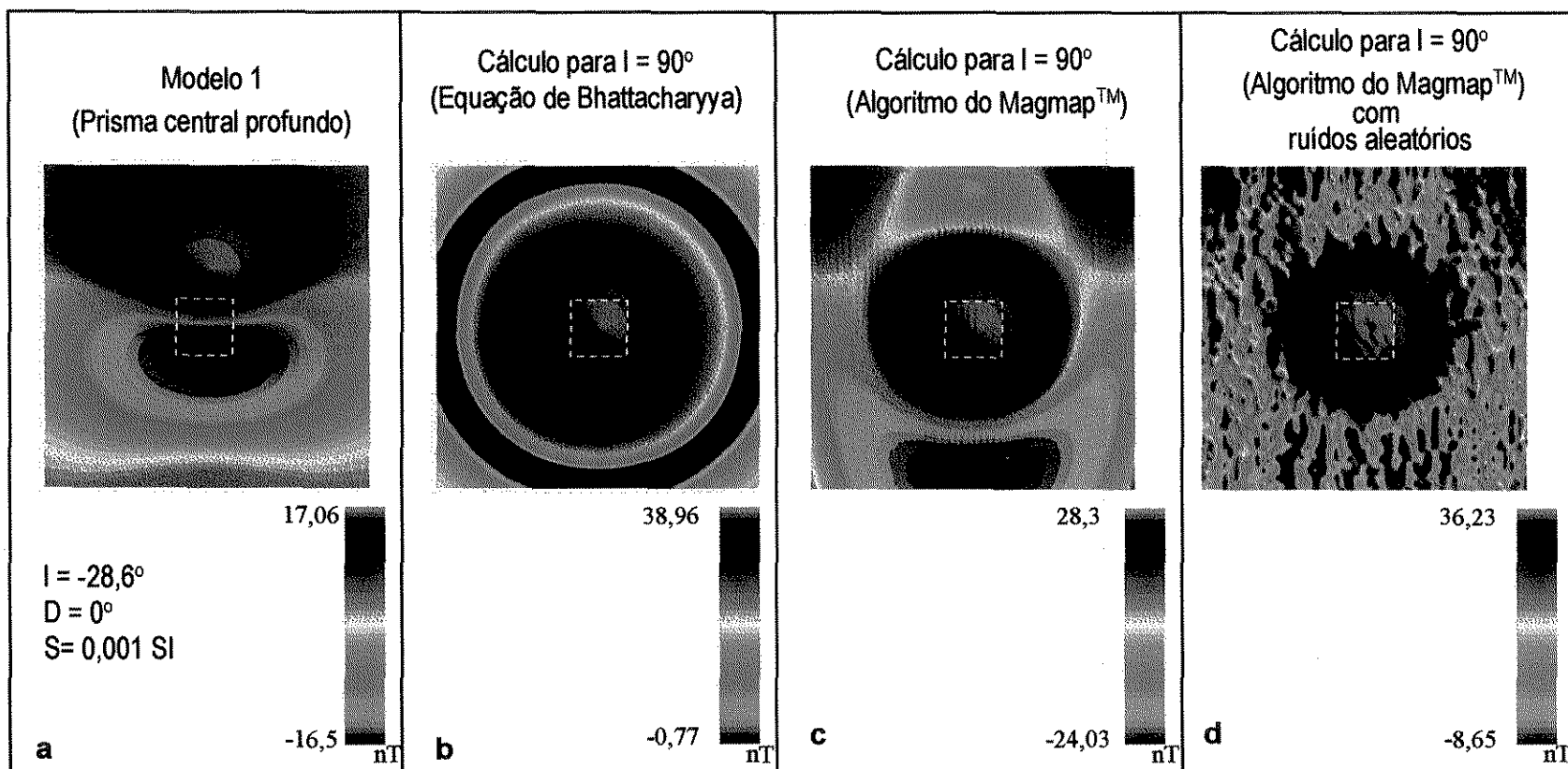
6.4.1 - ANOMALIA DE FONTE PROFUNDA

A imagens da Figura 6.4 mostram os efeitos da redução ao pólo em um prisma profundo central (Figura 6.4a). O modelo sintético, quando calculado para a latitude magnética de 90° pela equação de Battacharyya (Figura 6.4b), mostra o posicionamento da anomalia diretamente sobre o prisma e um halo negativo ao seu redor.

A anomalia reduzida ao pólo pelo algoritmo do MagmapTM (caso sem ruído) centraliza a anomalia sobre a fonte, mas cria um pólo negativo artificial, mantendo sua assimetria com valores negativos ao sul (Figura 6.4c). Além disso, os valores de amplitude são alterados em torno de 30%, quando comparado com o calculado pela equação de Battacharyya (Figura 6.4b). A Figura 6.4d mostra o mesmo procedimento, desta vez, com a inclusão de ruídos aleatórios para avaliar o desempenho do algoritmo MagmapTM em recuperar a forma da anomalia. A redução ao pólo introduz um alinhamento dos ruídos, antes distribuídos em todas as medidas, na direção do norte magnético e uma distorção na forma da anomalia. Observa-se um aumento da amplitude da anomalia em torno de 30% em relação àquela que seria esperada em consequência da amplificação dos ruídos (Figura 6.4b).

6.4.2 - ANOMALIA TRUNCADA DE FONTE PROFUNDA

A seqüência de imagens da Figura 6.5 mostra os efeitos causados pela presença de anomalias magnéticas profundas truncadas na aplicação do filtro de redução ao pólo (Figura 6.5a). Da mesma forma que o modelo de prisma profundo central, a aplicação da equação de Battacharyya apresenta valores negativos na borda da anomalia (Figura 6.5b). Mesmo assim, observa-se que a anomalia verdadeira fica centrada diretamente sobre o prisma calculado. A redução ao pólo calculada pelo algoritmo do MagmapTM causa uma distorção na anomalia, na qual grande parte do pólo negativo é deslocado para o canto inferior direito da janela de dados.



Legenda:

I = Inclinação do campo geomagnético
 D = Declinação do campo geomagnético
 S = Susceptibilidade magnética

Ruídos
aleatórios

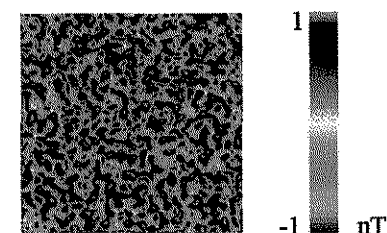
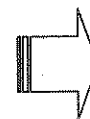
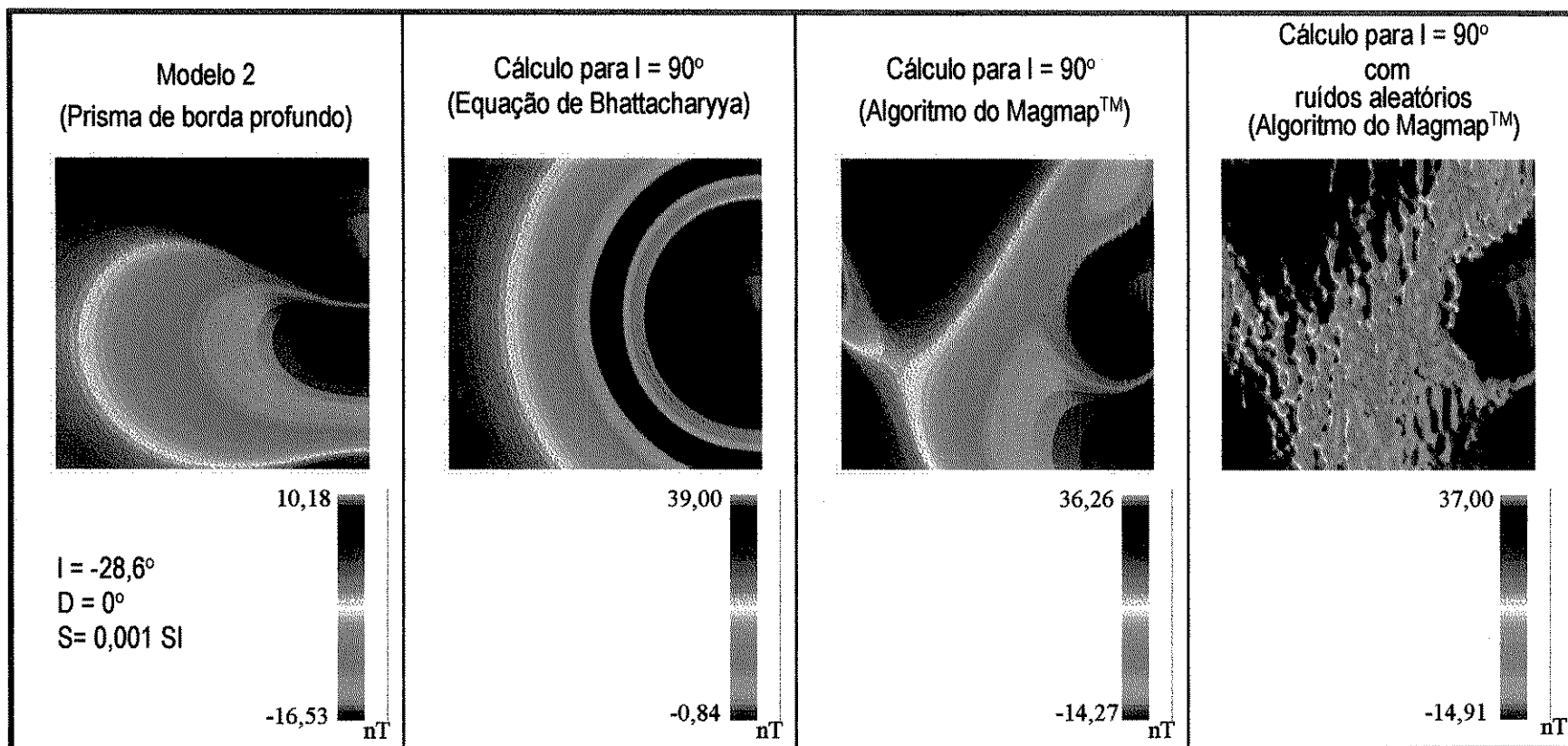


Figura 6.4 - Efeito de fontes profundas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de prisma central profundo, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do Magmap™, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios.



Legenda:

I = Inclinação do campo geomagnético
 D = Declinação do campo geomagnético
 S = Susceptibilidade magnética

Ruídos
aleatórios

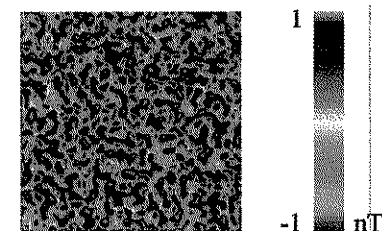


Figura 6.5 - Efeito de fontes truncadas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de prisma de borda profundo, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do MagmaTM, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios.

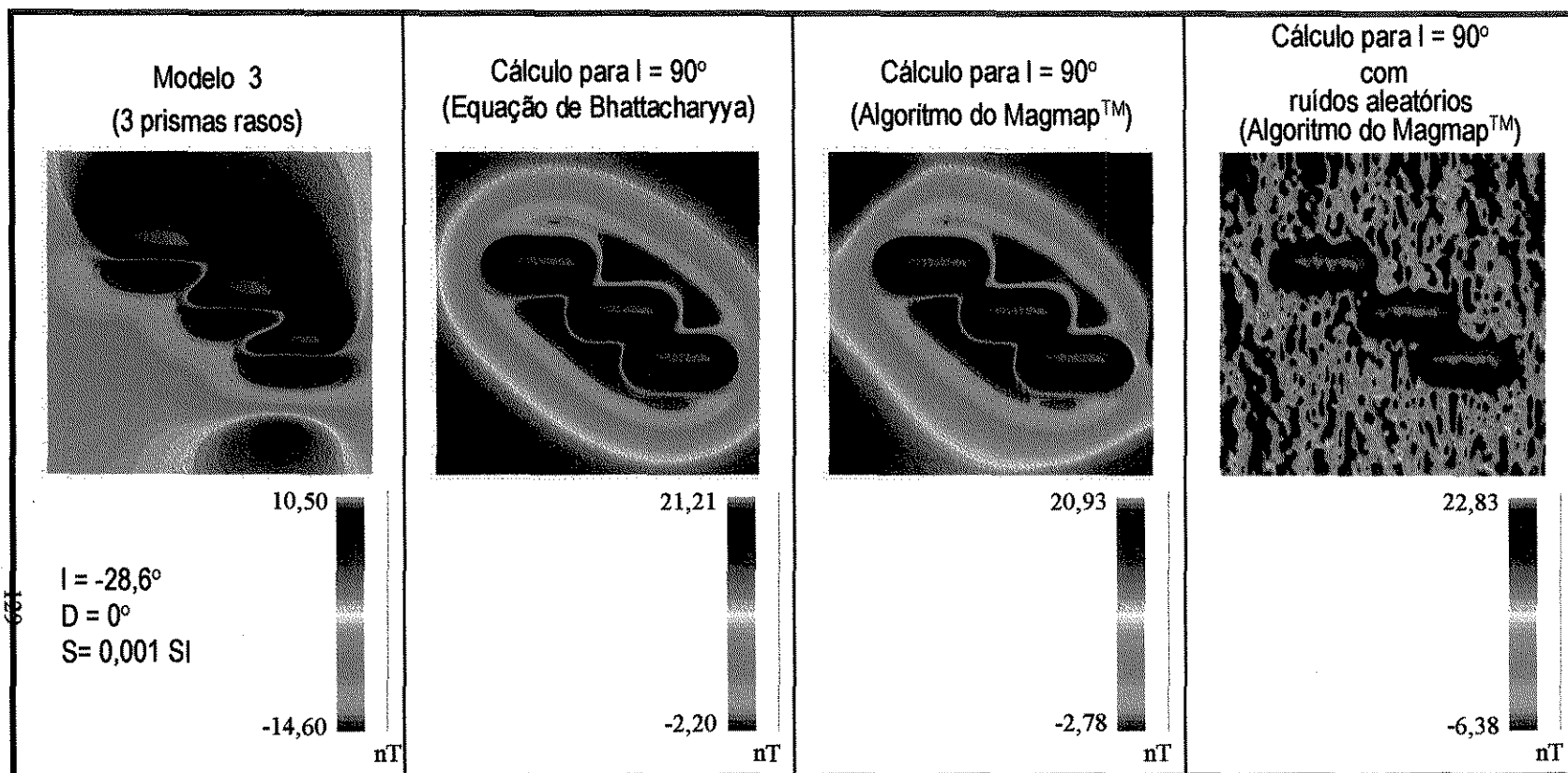
Esse procedimento gera anomalias fictícias na borda NW, dificultando a interpretação dos resultados (Figura 6.5c). Com a introdução de ruídos, o alinhamento dos sinais de alta frequência na direção do norte geomagnético causa um aumento dessa distorção (Figura 6.5d). Nota-se o aparecimento de altos na anomalia no canto NW do mapa, que não guardam qualquer correspondência com a anomalia verdadeira.

6.4.3 - ANOMALIAS DE FONTES RASAS

A redução ao pólo de anomalias associadas a prismas rasos mostra um desempenho semelhante das fontes profundas central e truncadas, evidenciando o mesmo tipo de distorções, realçadas na presença de ruídos (Figura 6.6a a 6.6d). O algoritmo apresenta um bom desempenho para dados sem ruídos, o que demonstra a importância da janela de dados no filtro de redução ao pólo. Com a inclusão de ruídos, são verificadas as mesmas instabilidades.

6.4.4 - TESTE PARA PRESENÇA DE FONTES EXTERNAS

A Figura 6.7a apresenta uma anomalia gerada pela soma de um prisma profundo de borda (Figura 6.2a) e três prismas rasos (Figura 6.3a). A anomalia teórica calculada pela equação de Bhattacharyya mostra as anomalias centradas sobre os prismas, apesar da interferência introduzida pela soma de fontes rasas e profundas truncadas (Figura 6.7b). A resposta obtida com o algoritmo MagmapTM também mostra distorções nas formas das anomalias causadas pela interferência dos sinais de alta e de baixa frequências, assim como pela introdução do fator de correção de amplitude. Mesmo assim, as anomalias assumem valores positivos diretamente sobre as fontes prismáticas. É importante mencionar o surgimento de feições espúrias na borda NW da janela (Figura 6.7c). Na presença de ruídos, elas mantêm o padrão de alongamento segundo o norte geomagnético, causando distorções da anomalia nesta direção (Figura 6.7d). Isto mostra que a presença de interferências externas não compromete a redução ao pólo de anomalias rasas, mas gera feições espúrias de maior comprimento de onda.



Legenda:

I = Inclinação do campo geomagnético
 D = Declinação do campo geomagnético
 S = Susceptibilidade magnética

Ruídos
aleatórios

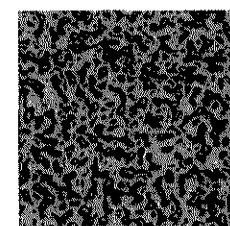
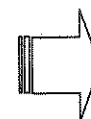
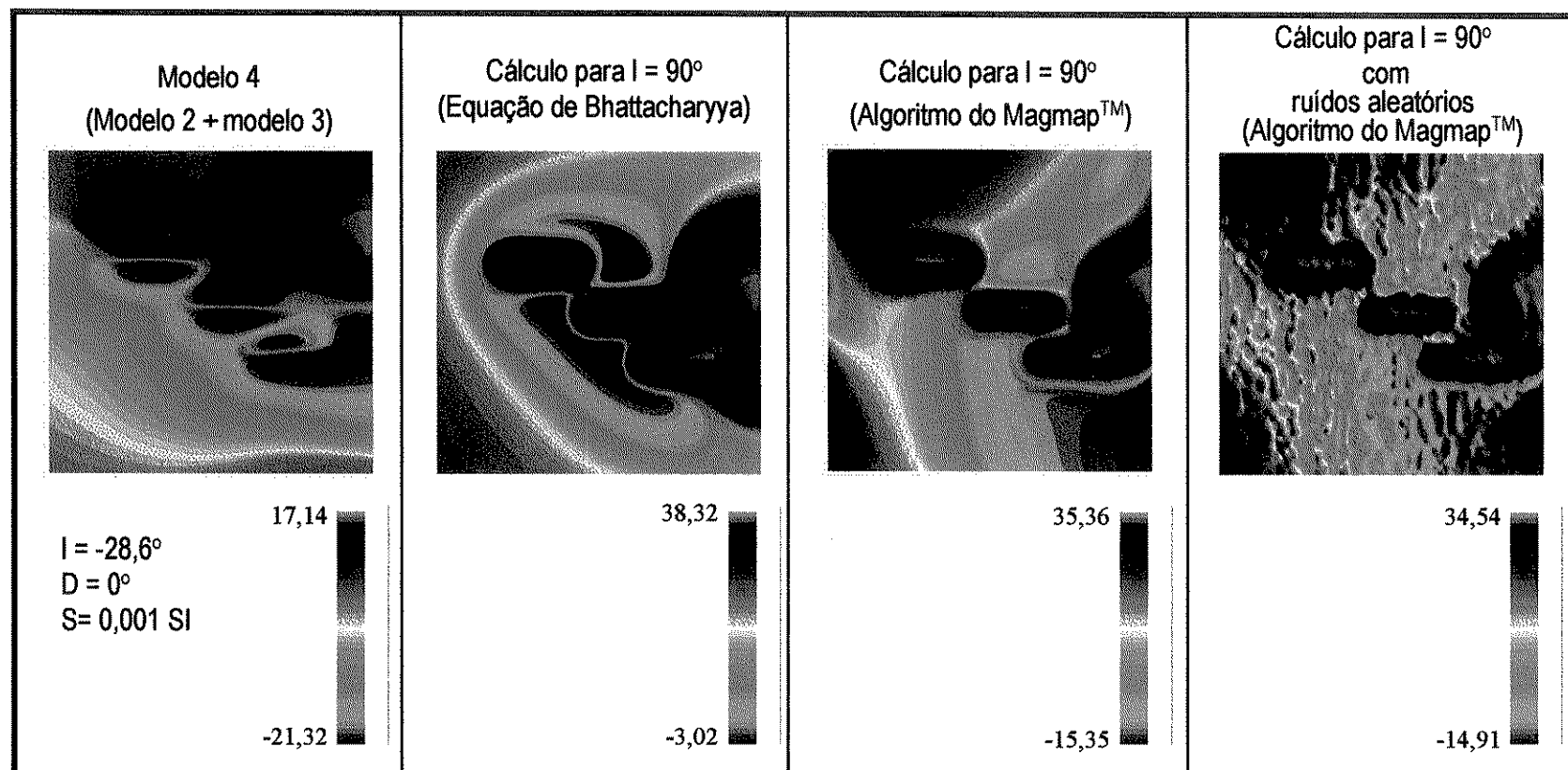


Figura 6.6 - Efeito de fontes rasas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de 3 prismas rasos, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do Magmap™, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios.



Legenda:

I = Inclinação do campo geomagnético
 D = Declinação do campo geomagnético
 S = Susceptibilidade magnética

Ruídos
aleatórios

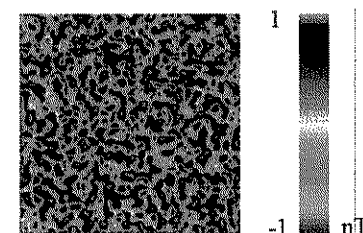


Figura 6.7 - Efeito de interferências externas no filtro de redução ao pólo. (a) modelo de prisma central profundo somado a 3 prismas rasos, (b) cálculo com equação de Bhattacharyya, (c) cálculo com algoritmo do Magmap™, (d): cálculo com introdução de ruídos aleatórios.

Discussão do item 6.4:

Apesar da redução ao pólo ser uma alternativa à interpretação de dados magnéticos obtidos em outras latitudes magnéticas, pode haver uma restrição na aplicação desse filtro em latitudes magnéticas menores ou próximas a 20°. Os testes realizados nesta etapa comprovam essa restrição, já discutida nos trabalhos de Vacquier *et al.* (1951), Baranov & Naudy (1964), Mantovani & Shukowsky (1983), Arkani-Hamed (1988), Silva (1986), Hansen & Pawlowiski (1989), Mendonça & Silva (1993), McLeod (1993a e 1993b), Swain (2000) (ver item 5.3.7.2).

Este filtro tem sido utilizado, principalmente, em levantamentos de caráter regional (Mantovani & Shukowsky 1983, McLeod 1993a e 1993b e Swain 2000), onde os resultados não chegam a restringir a análise qualitativa dos dados. No entanto, o avanço constante na qualidade dos levantamentos aeromagnéticos de alta resolução exige um maior controle das técnicas de processamento empregadas para a geração de produtos detalhados de interpretação, com o maior controle possível de posicionamento das anomalias. Nesta situação, recomenda-se a aplicação da redução ao pólo, juntamente com o cálculo da amplitude do sinal analítico, a título de julgar a confiabilidade dos resultados obtidos.

A restrição do filtro de redução ao pólo é aumentada principalmente na presença de fonte magnética profunda externa à janela de dados de fontes rasas. Neste caso, apesar de não haver uma alteração substancial na centralização das anomalias de fontes rasas, há uma interferência marcante causada por fontes externas à janela de dados, que é ainda mais realçada pela existência de ruídos.

6.5 - EFEITOS DE FONTES RASAS NO MAPA DE AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO

A seqüência de imagens da Figura 6.8 ilustra o efeito da presença de fontes rasas em anomalias profundas no mapa da amplitude do sinal analítico. As Figuras 6.8b e 6.8e mostram o sinal analítico calculado usando o algoritmo do MagmapTM para modelos prismáticos de fontes profunda central (Figura 6.8a) e de borda (Figura 6.8d), respectivamente.

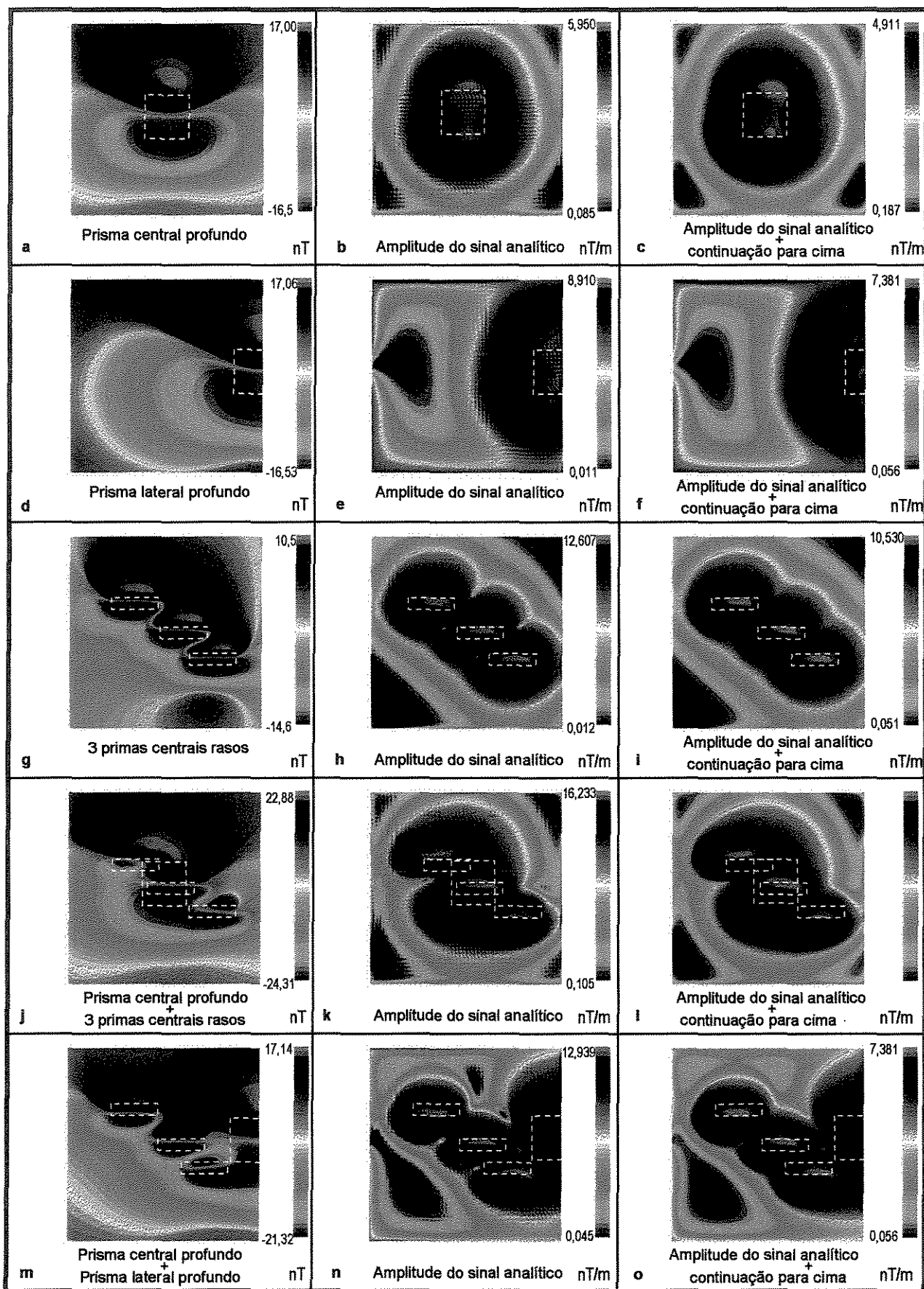


Figura 6.8 - Efeitos na amplitude do sinal analítico causados por diferentes posicionamentos das fontes.

Observam-se dois picos da função sobre as bordas dos prismas com um contorno pouco definido devido à proximidade das mesmas. Além disso, a combinação dos gradientes vertical e horizontais no cálculo da amplitude do sinal analítico realça as frequências mais altas, amplificando o ruído existente nos dados. Isto pode ser evitado com a aplicação de um filtro de continuação para cima, numa distância de, por exemplo, metade do espaçamento entre as linhas de amostragem (Figuras 6.8e e 6.8f).

As Figuras 6.8g a 6.8i ilustram o mesmo procedimento para três prismas centrais rasos e mais estreitos. Neste caso, o pico da função ocorre diretamente no centro dos corpos e os ruídos são também atenuados com o filtro de continuação para cima.

Os efeitos da presença de fontes rasas em fontes profundas centrais e truncadas no cálculo da amplitude do sinal analítico estão ilustrados nas Figuras 6.8j a 6.8o. Observa-se uma distorção de seus máximos devido à interferência dos sinais de baixa frequência das fontes profundas central (Figura 6.8m). Os ruídos incorporados no cálculo são da mesma forma atenuados com o filtro de continuação para cima.

Discussão do item 6.5:

Apesar da ambigüidade na interpretação de alguns casos específicos (Capítulo 5.3.7), o cálculo da amplitude do sinal analítico é fundamental em áreas onde há uma suspeita de corpos com direção de magnetização diferente da presumida, bem como em casos onde o desempenho da redução ao pólo é comprometido pela baixa latitude magnética. Essa é a situação que se apresenta na área de estudo, uma região situada em baixa latitude magnética e caracterizada por uma complexa evolução tectônica com superposição de eventos deformacionais iniciados no Arqueano, que acarretam um padrão complexo na magnetização das rochas. Os resultados da redução ao pólo devem, portanto, ser interpretados com cautela e tais dificuldades podem, em parte, ser contornadas com a interpretação baseada na técnica do sinal analítico.

CAPÍTULO 7 - PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS DO CONVÊNIO GEOFÍSICA BRASIL-ALEMANHA

7.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo foi desenvolvido a partir da necessidade de interpretar algumas anomalias truncadas presentes na janela de dados aeromagnéticos da área de estudo e que não foram plenamente caracterizadas nas áreas restantes levantadas pelo PRV. A alternativa para entender integralmente essas anomalias foi adquirir e processar parte dos dados magnetométricos do CGBA, realizado na década de 1970, agora com as novas ferramentas de análise existentes. Desta forma, a reinterpretação dos dados do CGBA deve responder se as anomalias positivas na borda leste do PRV são causadas por fontes externas à janela dos dados ou não, principalmente, aquela situada na borda W da área estudada. Além disso, essa análise fornece dados complementares para um melhor entendimento do arcabouço tectônico da área estudada.

Várias técnicas de processamento foram utilizadas no tratamento desse banco de dados e não são mencionadas neste capítulo. Detalhes a respeito dessas técnicas são discutidos no Capítulo 5 (resultados do tratamento dos dados aerogeofísicos) e Capítulo 8 (processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos do PRV).

7.2 - PROCESSAMENTO DOS DADOS

7.2.1 - INTRODUÇÃO

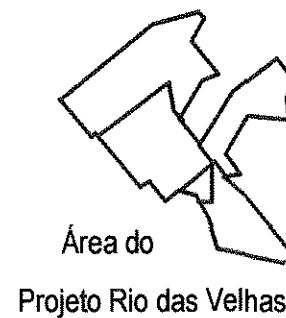
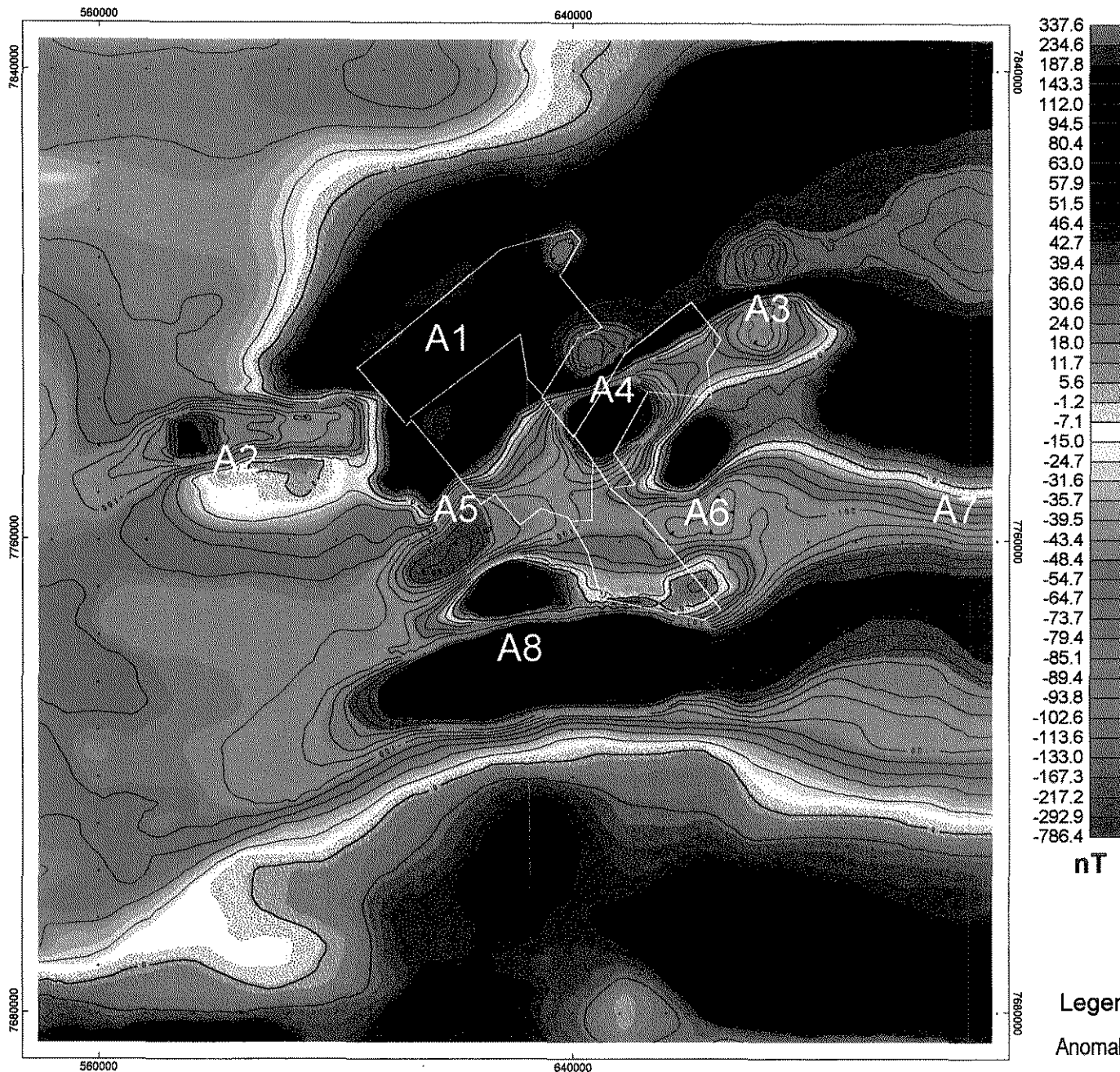
Os dados do CGBA foram disponibilizados na forma de arquivos "xyz" com anomalias de intensidade de campo magnético total corrigidas pelo modelo do IGRF (IAGA 1996). Os arquivos foram convertidos em malhas regulares com célula de 250 metros. O algoritmo de interpolação selecionado foi o de curvatura mínima, por ser um processamento rápido, que leva em conta poucas variáveis e pelos efeitos inerentes de suavização das anomalias de caráter regional geradas neste levantamento. Posteriormente, as malhas foram microniveladas pelo método de Geosoft (1997b) e, a

partir das técnicas de processamento aplicadas (ver Capítulo 5), foram gerados vários temas cujos resultados serão descritos a seguir.

7.2.2 - MAPA DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL

A Figura 7.1 mostra o mapa de intensidade do campo magnético total para a área do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. O arcabouço magnético desta área é complexo, apresentando anomalias de padrão reverso, anomalias truncadas, fontes superficiais (ffbs do SGM) mascaradas pelas anomalias regionais, bem como unidades magnéticas alinhadas segundo a direção do campo geomagnético. Na porção central da área observa-se um relevo perturbado formado por um conjunto de anomalias regionais com comprimentos de onda maiores que 100 km, alinhadas segundo a direção preferencial ENE-WSW e com amplitudes de até 1100 nT. Para facilitar a interpretação, as anomalias foram descritas separadamente e, posteriormente, analisadas de forma integrada.

- **Anomalia A1:** anomalia centrada aproximadamente nas coordenadas UTM 613306/7797982 e caracterizada por máximos alongados segundo a direção N50°E. A parte negativa de seus dipolos encontra-se mascarada pela presença da parte positiva das anomalias dipolares A4 e A5. Seu comprimento de onda é da ordem de 50 km e sua amplitude de 168 nT.
- **Anomalia A2:** anomalia centrada nas coordenadas UTM 574959/777861, caracterizada por um padrão de magnetização reversa. Esta anomalia encontra-se alongada segundo a direção ENE-WSW, infletindo para N60°E na sua porção esquerda.



Legenda:

Anomalias magnéticas = A1, A2, A3, ...



Seu comprimento de onda é da ordem de 50 km e sua amplitude de 215 nT, com o pólo negativo observando um gradiente moderado para NNW (32 nT/km), numa direção oposta da presumida para o posicionamento do campo magnético induzido na área.

- **Anomalia A3:** anomalia centrada nas coordenadas UTM 670594/7801676, alongada segundo a direção N70°E e com comprimento de onda na ordem de 15 km. Sua amplitude é de 234 nT, com um gradiente muito alto para SSE (78 nT/km).
- **Anomalia A4:** anomalia centrada nas coordenadas UTM 643682/7786305 e alongada segundo a mesma direção das anomalias A3 e A5, com comprimento de onda médio de 20 km. Possui amplitude de 741 nT e gradiente de 70 nT/km para SE.
- **Anomalia A5:** com a mesma direção das anomalias A3 e A4, a A5 está centrada nas coordenadas UTM 618211/7769011 e apresenta uma amplitude de 413 nT. Possui um gradiente suave de 20 nT/km e seu comprimento de onda médio é de 17 km.
- **Anomalia A6:** anomalia centrada nas coordenadas UTM 659542/7766129, com comprimento de onda na ordem de 13 km. Sua amplitude é de 226 nT, com um gradiente suave para SSE (20 nT/km).
- **Anomalia A7:** esta anomalia encontra-se na borda E da janela de dados e apresenta uma amplitude de 502 nT, com um gradiente bastante suave para SSE (5 nT/km), indicando fontes profundas.
- **Anomalia A8:** anomalia centrada aproximadamente nas coordenadas UTM 630706/7743072 e alongada segundo a direção ENE com um comprimento de onda na ordem de 80 km. Sua amplitude é de 839 nT e seu gradiente

muito alto (69 nT/km). Notam-se inflexões para NE e SW nas porções E e W, respectivamente, do par negativo de seu dipolo.

7.2.3 – ESPECTRO DE POTÊNCIA RADIAL MÉDIO DOS DADOS DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL

A Figura 7.2 mostra o espectro de potência radial médio calculado para os dados de intensidade de campo magnético total do Projeto Convênio Brasil-Alemanha. A análise do espectro de potência radial médio indica um conjunto de fontes com profundidade máxima para seus topos de 15,5 km, sugerindo a existência de fontes magnéticas na crosta superior. Além destas, observam-se fontes com profundidade em torno de 12, 5,8 e 3 km. Os intervalos de frequência restantes não apresentam informações confiáveis em função da introdução de ruídos causados pelo fenômeno de falseamento em números de onda maiores que 0,3 ciclos/km.

7.2.4 - MAPA DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL REDUZIDO AO PÓLO

A Figura 7.3 mostra o mapa de intensidade do campo magnético total reduzido ao pólo. Este procedimento serve para verificar a existência de magnetização remanescente e, caso presente, se ela é expressiva ou não. O diagnóstico de remanescência no mapa de anomalias magnéticas é imediato quando a anomalia apresenta inversão de polaridade, mas sua percepção torna-se mais difícil em situações onde a remanescência não é tão pronunciada. Nestes casos, a análise da anomalia reduzida ao pólo pode auxiliar o diagnóstico de remanescência. Se a direção de magnetização presumida for correta, deve-se esperar valores predominantemente positivos para a anomalia reduzida ao pólo.

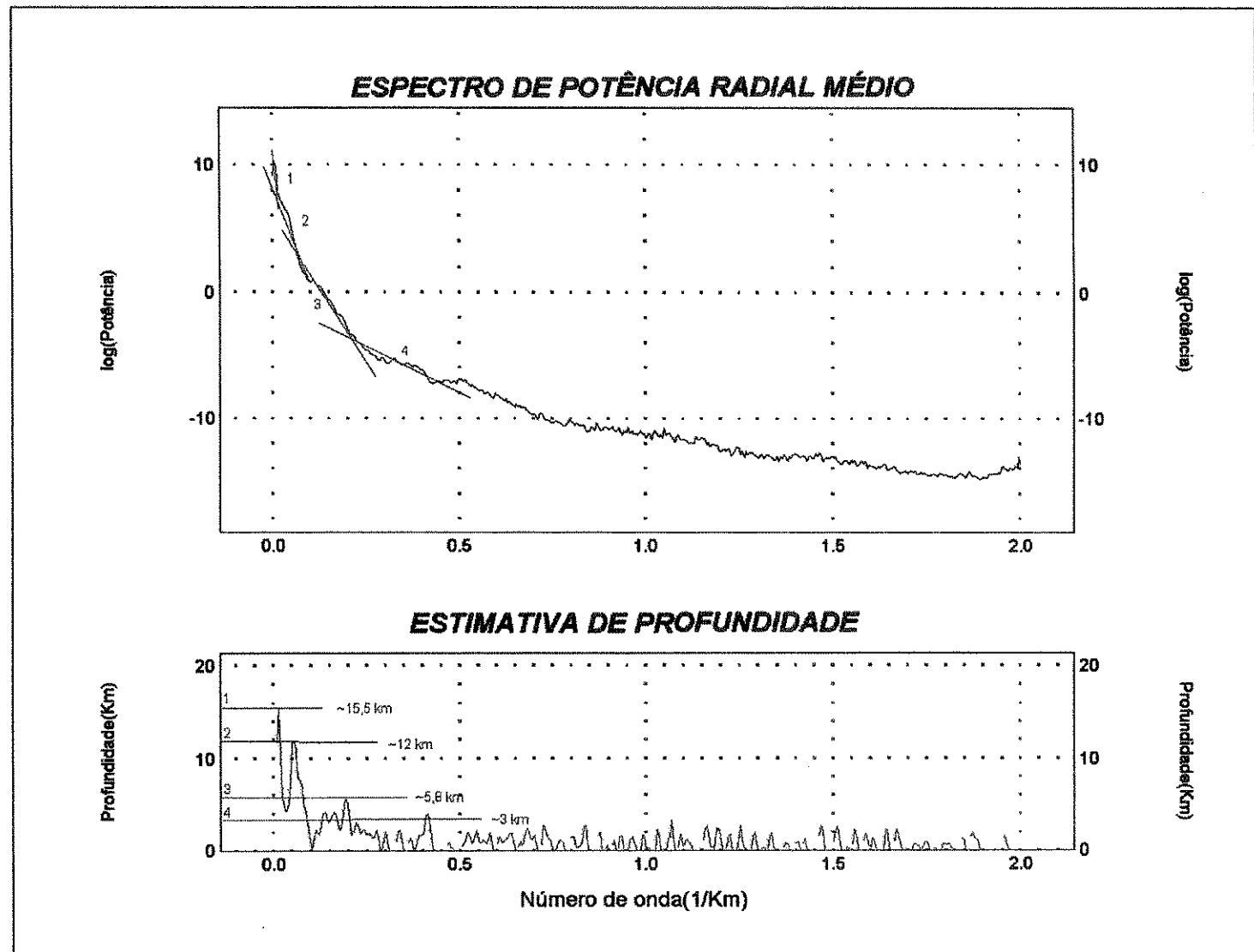
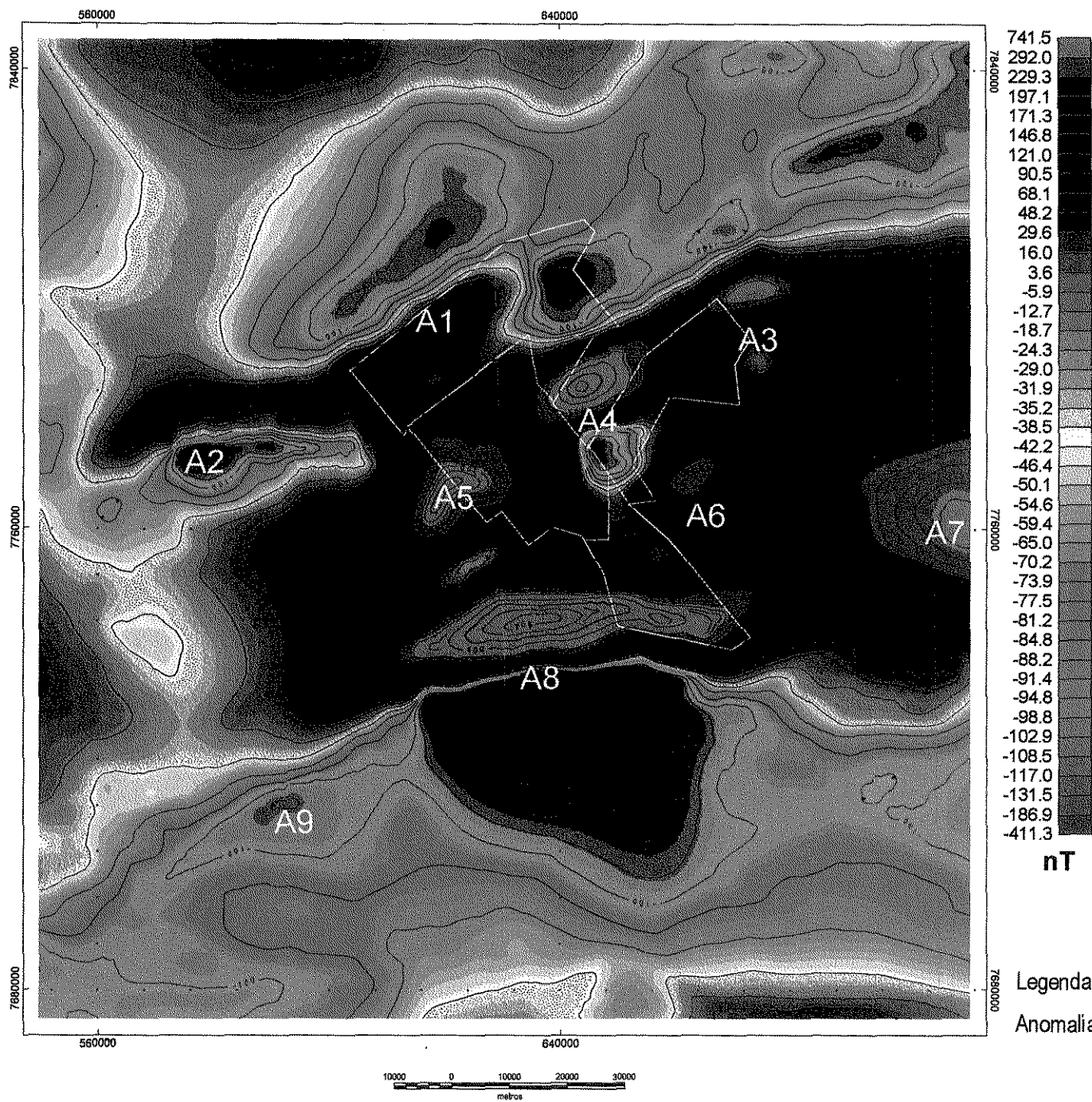


Figura 7.2 - Espectro de potência radial médio dos dados magnetométricos do Convênio Geofísica Brasil-Alemanha.



Área do
Projeto Rio das Velhas

Legenda:

Anomalias magnéticas: A1, A2, A3,...

Se isto não ocorrer, a direção de magnetização presumida (normalmente a mesma do campo geomagnético) deve ser considerada incorreta e a anomalia reduzida ao pólo tende a apresentar valores negativos da mesma ordem ou maiores (em módulo) que a parte positiva da anomalia, incompatível com o padrão normal esperado para anomalias no pólo.

O filtro de redução ao pólo apresentou desempenho razoável, não amplificando os ruídos na direção N-S magnética, como demonstrado nos testes de simulação (item 6.4). Isto se deve, em parte, ao caráter regional do levantamento e à atenuação de ruídos durante a continuação do campo para uma altura de 1 km efetuada pela CPRM (CPRM 1995). O fator de correção de amplitude utilizado no algoritmo de redução ao pólo (MagmapTM) não resultou em distorções dos sinais na direção da latitude magnética, permitindo uma interpretação de caráter preliminar da assinatura geofísica regional desta área. Por outro lado, a continuidade de algumas anomalias, evidentes no mapa de intensidade do campo magnético total (anomalias A1, A3, A4, A5 e A6 da Figura 7.1), não foi totalmente preservada nesta filtragem, mascarando alguns alinhamentos magnéticos regionais importantes.

Os resultados obtidos confirmaram uma direção de magnetização total diferente da presumida para várias anomalias presentes na área. O padrão reverso de magnetização diagnosticado na anomalia A2 foi confirmado, permanecendo o seu caráter dipolar mesmo após a redução ao pólo. A aplicação deste filtro também gerou dipolos invertidos nas anomalias A3, A4, A5 e A8, apesar de não haver inversão aparente no mapa de intensidade do campo magnético total (Figura 7.1). A presença dos dipolos leva às seguintes hipóteses: efeito isolado da magnetização remanescente, presença de corpos magnéticos inclinados ou uma ação combinada de ambos. No entanto, há uma dificuldade de se verificar a relação desta assimetria apenas à existência de corpos inclinados, sugerindo preponderância do efeito causado pela remanescência. Essa assimetria está bem representada nos modelos ilustrados nas Figuras 3.2 e 3.3. Observa-se um alinhamento magnético formado pelas anomalias A7, A8 e A9 que se estende além dos limites da área, formando um *trend* de direção ENE (anomalia A8) com inflexões para NE (anomalia A7) e SW (anomalia A9) nas suas porções E e W, respectivamente. A anomalia A9, imperceptível no mapa de intensidade

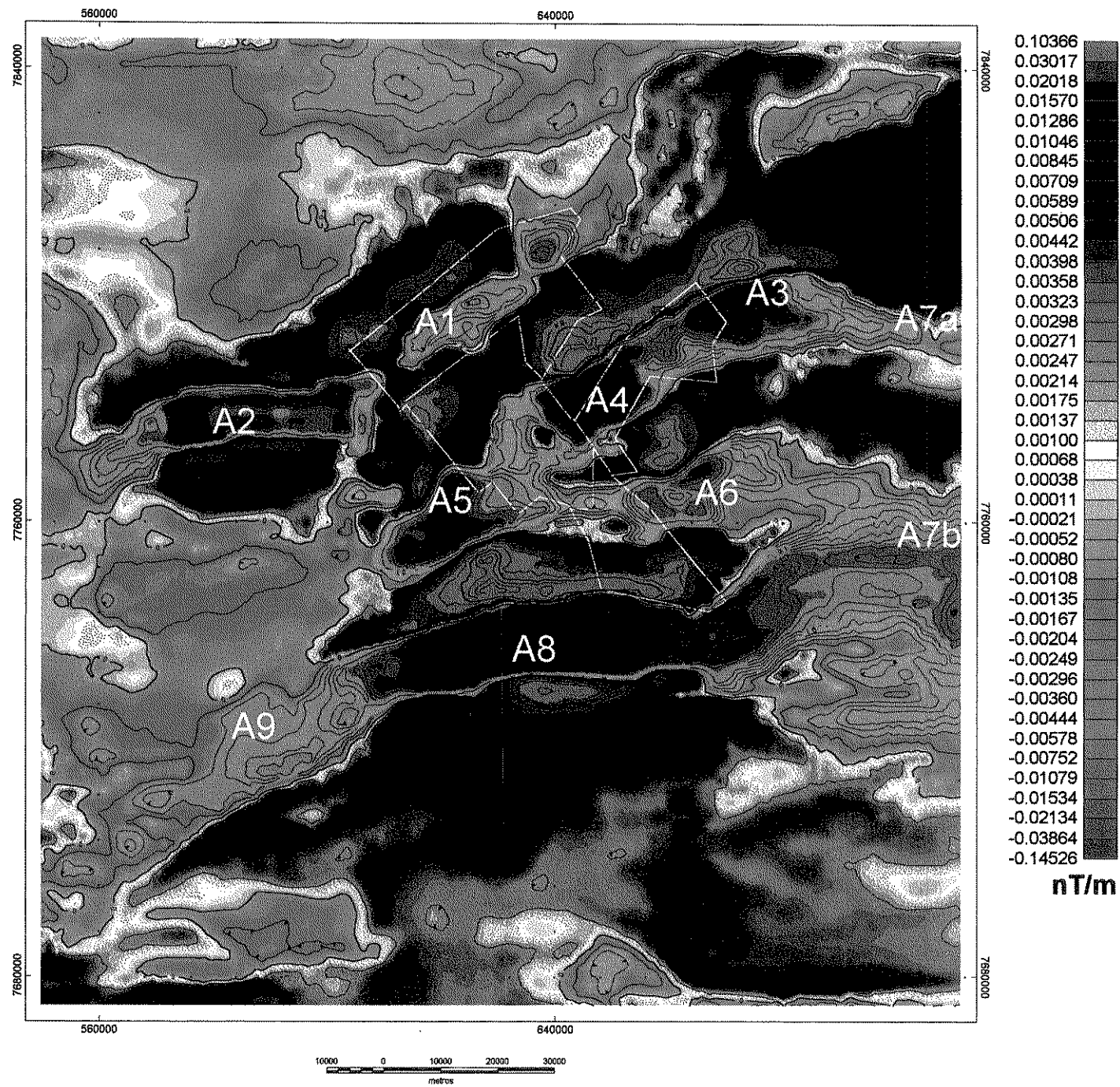
do campo magnético total (Figura 7.1), mostra um padrão reverso através da permanência de seu par negativo na filtragem. Tanto na Figura 7.1 quanto na Figura 7.3, percebe-se que este alinhamento possui padrões diferentes de magnetização, havendo uma contribuição de fontes mais rasas apenas na anomalia A8. As anomalias A7 e A9 parecem refletir uma geometria de fonte profunda, devido à maior suavidade de seus gradientes.

7.2.5 - MAPA DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL

O mapa de primeira derivada vertical realça variações mais sutis das anomalias através da supressão dos componentes de maior comprimento de onda (fontes mais profundas), além de melhorar a resolução de anomalias interferentes causadas por corpos adjacentes. O produto gerado é bastante útil para o mapeamento de fontes mais rasas, muitas delas de significado geológico e estrutural. Este processo também pode realçar ruídos nos dados, decorrentes de problemas de nivelamento, fontes rasas sub-amostradas, entre outros.

A Figura 7.4 ilustra o mapa de primeira derivada vertical, com alguns aspectos característicos importantes, como:

- Presença de anomalias mais estreitas do que as presentes no mapa de intensidade de campo magnético total (Figura 7.1),
- Surgimento de pólos negativos em situações inexistentes nas anomalias de campo total (comparar anomalia A1 nas Figuras 7.1 e 7.4), realçando tendências já existentes,
- Eliminação dos efeitos dos grandes comprimentos de onda regionais,



- Melhor definição das anomalias de menor comprimento de onda através da remoção da interferência lateral de anomalias de campo total (comparar as anomalias das figuras 7.1 e 7.4).

Em termos de associação com a geologia do Quadrilátero Ferrífero, o mapa de gradiente vertical filtra os sinais relativos às fontes mais profundas, realçando as anomalias de fontes mais rasas relativas às ffb's presentes no SGM (Grupo Itabira). Além disso, esse realce permite uma melhor visualização do condicionamento estrutural dessas unidades com maior concentração de minerais magnéticos, como hematita e magnetita de substituição (Dorr 1969). Uma análise comparativa pode ser feita entre as Figuras 7.4 e 1.1, com auxílio da transparência referente ao mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero anexado na contracapa deste volume.

Observa-se que o alinhamento formado pelas anomalias A7, A8 e A9 no mapa de intensidade de campo magnético total (Figura 7.1) é realçado, mas perde sua continuidade para ENE (anomalia A7) e para SW (anomalia A9). Esse padrão resultante indica uma contribuição do SGM apenas no domínio da anomalia A8, definindo seu limite S, SSW e SSE, nas imediações do contato com as unidades do CMB. Fora desses limites, a mudança de padrão do alinhamento, agora com características regionais nas porções ENE e SW, sugere uma continuidade em profundidade de uma fonte magnética situada abaixo do SGM.

7.2.6 - MAPA DE PRIMEIRA DERIVADA DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL REDUZIDO AO PÓLO

Os mapas derivados do filtro de redução ao pólo não são ideais para o entendimento das anomalias desta área em função da presença de remanescência nos mapas intensidade de campo magnético total (Figura 7.1, item 7.2.2) e de primeira derivada vertical (Figura 7.4, item 7.2.5). No entanto, eles são válidos para confirmar a suspeita de direções de magnetização total diferente da presumida, principalmente em

locais onde o reconhecimento de padrões dipolares é dificultado pela interferência de anomalias, como é o caso das anomalias A1, A3, A4, A5 e A6 (Figuras 7.1 e 7.3).

Desta forma, o gradiente vertical dos dados realça o padrão reverso de magnetização das anomalias A1, A3, A4, A5 e A6 (Figura 7.5), parcialmente mascarado pela contribuição das fontes mais profundas observada nos mapas de intensidade do campo magnético total (Figura 7.1) e reduzido ao pólo (Figura 7.3), confirmando a suspeita de remanescência nas unidades do SGM.

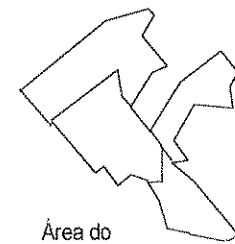
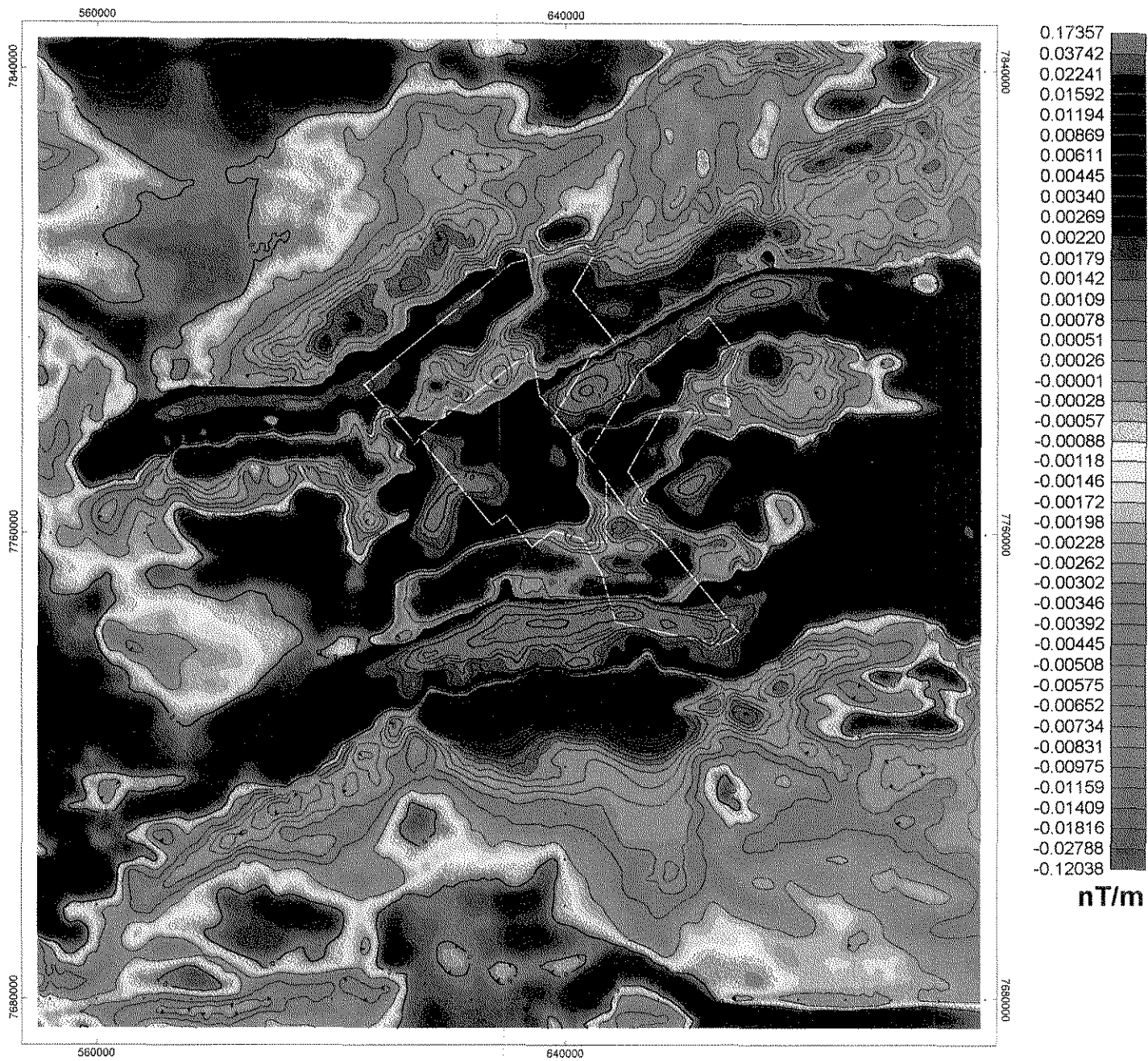
7.2.7 - MAPA DE AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO

O sinal analítico é formado pela combinação dos gradientes horizontais e vertical de uma anomalia magnética, possuindo uma forma que depende da posição de suas fontes causativas, mas independente das direções do campo geomagnético e da magnetização das fontes.

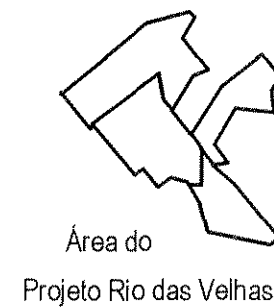
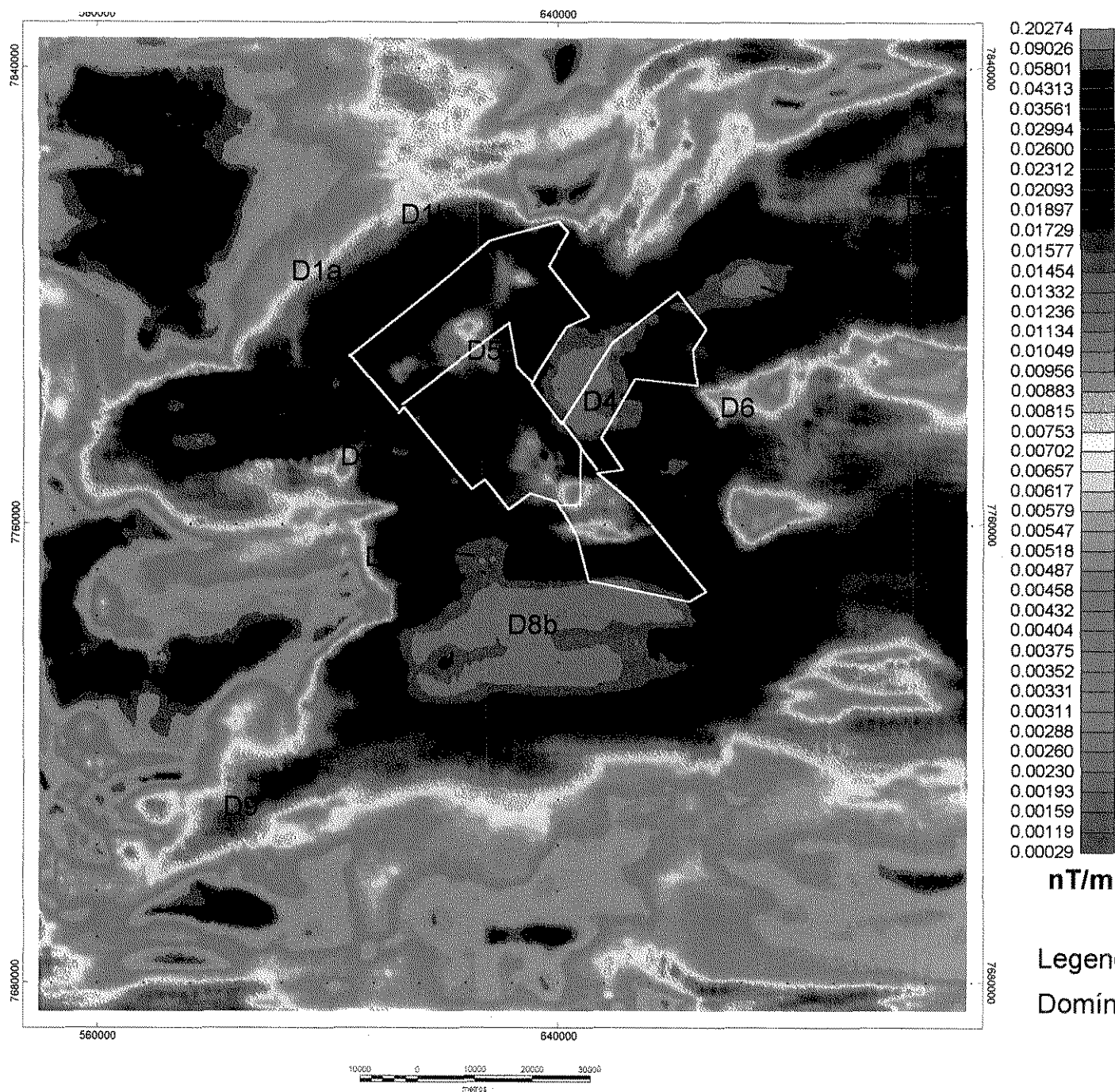
Com o diagnóstico de remanescência observado na redução ao pólo (item 7.2.4) e reafirmado no mapa de gradiente vertical resultante (item 7.2.6), opta-se por calcular a amplitude do sinal analítico com o propósito de delimitar as fontes geradoras de anomalias magnéticas.

A Figura 7.6 mostra a amplitude do sinal analítico calculada a partir dos valores das derivadas x,y,z das anomalias magnéticas dos dados de intensidade de campo total. O mapa é apresentado na forma de imagem colorida sem iluminação direcional para facilitar a visualização dos gradientes e amplitude do campo. A interpretação foi feita em domínios de contrastes magnéticos (D1, D2, etc) e com o auxílio dos mapas de intensidade de campo magnético total e gradiente vertical.

Os máximos de amplitude (domínios D1 a D6 e D8) coincidem com as unidades do SGM (Grupo Itabirito) à exceção daquelas cuja direção das ffb's alinham-se com a direção do campo geomagnético ($-20,7^\circ$), localizadas na Serra do Caraça (domínio D6) e na Serra da Moeda (a SW do Complexo Metamórfico Bação, entre as serras do Curral e Ouro Branco).



Área do
Projeto Rio das Velhas



A Serra da Moeda é caracterizada pelos domínios D5a e D5b, ambos presentes no limite entre as unidades do SGM e SGRV. Essa interpretação pode ser melhor visualizada, comparando-se as Figuras 1.1 e 7.6, juntamente com a transparência auxiliar referente ao mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero anexado na contracapa deste volume.

As anomalias D5a e D5b associam-se à anomalia A5 do mapa de gradiente vertical, também identificada parcialmente numa análise preliminar dos dados do PRV. Na janela de dados do PRV tal anomalia é predominantemente positiva e domina mais da metade da área de estudo, dificultando a sua interpretação. Esse aspecto motivou a inclusão dos dados do CGBA, cuja área de abrangência permite uma visualização completa das anomalias de toda a região do Quadrilátero Ferrífero.

Observa-se um máximo de pequena dimensão (domínio D5a) localizado em duas unidades do GNL (Mestre Caetano e Córrego do Sítio). Não há registro de mapeamento de rochas com expressiva concentração de minerais magnéticos sugerindo a existência de fontes em profundidade. O domínio D5b é caracterizado por uma anomalia presente em ambas as unidades do SGM e SGRV (GNL). Uma vez que as unidades do SGRV possuem fontes fracamente magnéticas, sugere-se que as mesmas estão cavalgadas sobre parte das fontes magnéticas mais profundas do SGM (Figura 1.1).

Os domínios D3 e D4 são caracterizados por máximos sobre as fontes associadas às unidades ferríferas do SGM presentes no Sinclinal do Gandarela (Figura 1.1). A porção sul desse supergrupo (domínio D4) encontra-se abaixo dos litotipos do *Greentone Belt* Rio das Velhas, num contato por empurrão, formando um arqueamento de vergência para W.

O domínio D8b está associado às unidades ferríferas presentes no Sinclinal Dom Bosco (SGM), em contato com o Complexo Metamórfico Bação, com seus máximos de amplitude registrando claramente a geometria de seus flancos através de dois eixos de direção E-W (comparar Figuras 7.6 e 1.1). O arranjo estrutural complexo observado no contorno deste sinclinal, onde se desenvolveram cavalgamentos de direção N-S e vergência W, cortando nitidamente sua estrutura sinformal é devido à ação do evento compressional Brasileiro (Chemale *et al.* 1991 e Alkmim *et al.* 1998).

Os dois máximos localizados nas anomalias do domínio D8a correspondem a um corpo intrusivo arqueano, denominado Granodiorito Engenheiro Correia de idade arqueana, conforme os mapeamentos de Herz (1961 e 1970) e Ricomini & Amaral (1980). As anomalias fornecem uma posição mais localizada de dois corpos intrusivos preservados no Complexo Metamórfico Bação.

Os domínios D7 e D9 caracterizam-se por valores mais baixos de amplitude do sinal analítico e correspondem a uma superfície de menor contraste magnético proveniente de fontes mais profundas. Da mesma forma, são observados valores mais baixos associados às unidades do SGRV, em geral, não magnéticas. A máscara referente ao levantamento aerogeofísico do PRV apresentada na Figura 7.6 ilustra bem o contorno dessas unidades.

Discussão:

A qualidade dos dados do CGBA assim como dos produtos gerados pelos processamentos aplicados satisfazem os requisitos necessários ao entendimento e à interpretação das respostas magnéticas causadas pelas fontes associadas às anomalias de borda da janela de dados do PRV, objetivo deste capítulo. No que se refere aos arquivos xyz, essa qualidade pode ser notada pela correspondência e consistência na exatidão do georreferenciamento entre as informações geofísicas e geológicas integradas e apresentadas nos mapas.

Os resultados dos processamentos são satisfatórios e mostram que a anomalia magnética predominantemente positiva situada na borda W do PRV (conforme será visto no Capítulo 8) corresponde a uma fonte magnética dentro da janela de dados.

Os testes sintéticos também foram úteis na escolha do filtro de redução ao pólo, mesmo sob as condições desfavoráveis demonstradas para levantamentos em baixas latitudes magnéticas (ver item 6.4). Os resultados apresentados são satisfatórios em relação às propostas de avaliação preliminar do arcabouço geofísico-estrutural regional da área e confirmam a presença de direção de magnetização diferente da existente para o campo geomagnético atual.

Da mesma forma, o mapa de anomalia magnética (campo total) dá uma idéia do padrão das anomalias presentes, permitindo uma análise qualitativa preliminar do arcabouço estrutural regional do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. De uma forma geral, o alinhamento geral das anomalias é dominado pelo efeito das ffb's do SGM (Grupo Itabira), embora isto não fique evidente onde essas unidades encontram-se na mesma direção do campo geomagnético terrestre (Serras do Caraça e da Moeda) (Figuras 7.4 e 1.1).

A anomalia D2 (Figuras 7.1, 7.4 e 7.6) está associada à porção W da Serra do Curral (Figura 1.1), cujo acamamento mergulha abruptamente para SE, representando o restante do flanco invertido de um anticlinal com vergência NW (Chemale *et al.* 1991). Estes autores ainda mencionam que grande parte deste segmento foi poupada da deformação EW brasileira em relação ao segmento E da Serra do Curral. A porção E descrita pelos mesmos autores encontra-se deslocada de sua posição original e corresponde à anomalia D2.

A suspeita de remanescência nas unidades do SGM foi confirmada no mapa de gradiente vertical (Figuras 7.5) dos dados reduzidos ao pólo (Figuras 7.3), realçando o padrão reverso de magnetização das anomalias 1, 3, 4, 5 e 6 (Figura 7.5).

Um dos corpos magnéticos associado ao domínio D8a refere-se ao Granodiorito Engenheiro Correia e foi descrito inicialmente por Herz *et al.* (1961). Posteriormente, Herz (1970) englobou-o numa unidade maior, descrevendo-a como uma rocha cinza-escura, de granulação fina, pobremente foliada, constituída por plagioclásio (~50%), quartzo (~30%), microclínio e pertita (10%), biotita (6-14%), muscovita, magnetita, apatita, zircão e clinozoisita. Herz (1970) ainda datou biotitas muito antigas nesta unidade com K/Ar, chegando a uma das maiores idades para a região (entre 2510 a 2310 Ma). Ricomini & Amaral (1980) identificaram estruturas circulares concêntricas associadas ao corpo inicial descrito por Herz *et al.* (1961), sugerindo uma origem diversa das rochas situadas ao seu redor. As características de contraste magnético obtidas no cálculo da amplitude do sinal analítico, aliadas às informações mencionadas acima, reafirmam a presença de um núcleo formado por dois corpos intrusivos arqueanos preservados no CMB.

Aquelas unidades magnéticas presentes no SGM que se encontram alinhadas segundo a direção do campo geomagnético não foram totalmente representadas, deixando sua interpretação mais restrita.

De acordo com o objetivo principal dessa etapa, foi confirmada a presença da anomalia A5 com expressivo valor de amplitude do sinal analítico (anomalia D5a) dentro da janela de dados do PRV, sugerindo a hipótese de fontes em profundidade cuja origem pode estar nas unidades fortemente magnéticas do SGM posicionadas abaixo do SGRV. Esse posicionamento seria devido ao cavalgamento das rochas do SGRV (GNL) sobre as unidades do SGM. No entanto, não há registro de rochas com expressiva concentração de minerais magnéticos comprovando a existência de fontes em profundidade.

CAPÍTULO 8 - PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS DO PROJETO RIO DAS VELHAS

8.1 - INTRODUÇÃO

A seguir, são apresentados os resultados do processamento, análise e interpretação dos dados aerogeofísicos do PRV referentes à porção central do Quadrilátero Ferrífero.

Cabe ressaltar que o reduzido tamanho de célula da malha dos mapas de levantamentos aerogeofísicos de alta resolução permite o reconhecimento de variações nas propriedades físicas das rochas que, muitas vezes, se apresentam sutis em avaliações de campo, onde, ao nível da superfície, as rochas encontram-se alteradas (Jaques *et al.* 1997). Por outro lado, no caso de dados magnetométricos, uma característica comum nesse tipo de levantamento é a presença de anomalias truncadas, pois seu objetivo principal é definir o caráter geofísico de áreas de interesse em escala de detalhe como apoio à exploração mineral. Essa situação ocorre no PRV, onde anomalias de caráter regional ocorrem na borda da janela de dados, condicionando feições magnéticas de menor amplitude associadas à ocorrência de ffbs, rochas serpentínicas, alinhamentos estruturais e zonas de cisalhamento que podem estar relacionadas à mineralização aurífera.

As etapas de processamento e interpretação dos dados magnetométricos desse capítulo foram desenvolvidas a partir dos resultados dos testes de simulação de desempenho, a partir do cálculo dos valores teóricos de anomalias magnéticas correspondente a um prisma retangular vertical (Capítulo 6) e do tratamento dos dados do CGBA (Capítulo 7). Desta forma, foi possível o entendimento do caráter e da causa das respostas magnéticas das fontes presentes subsidiando a interpretação geológica das anomalias de borda.

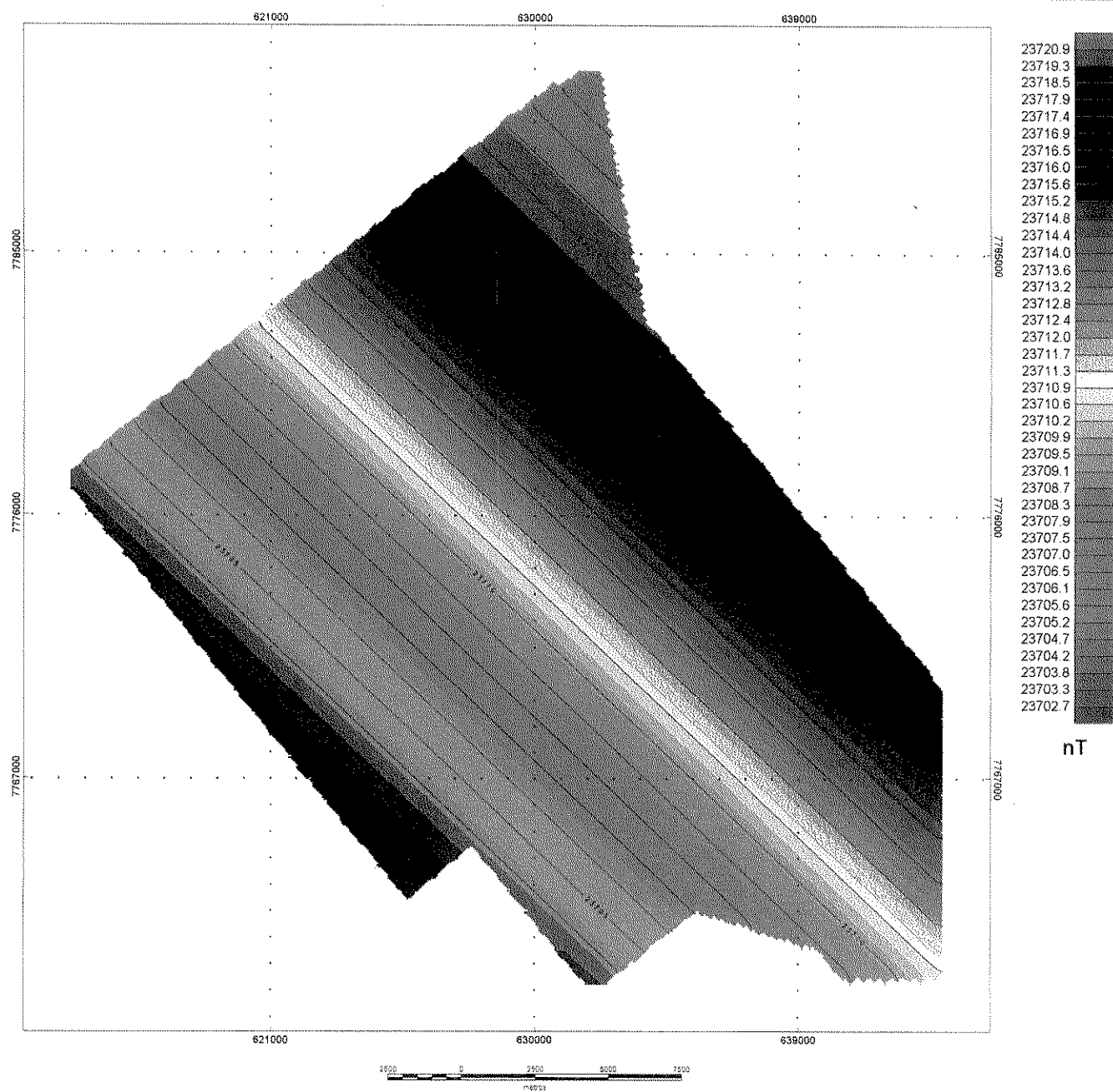
8.2 - REMOÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO REGIONAL DA TERRA

Os valores das anomalias do campo total dos dados magnetométricos foram calculados a partir das medidas do campo total, subtraindo-se a magnitude do campo regional, neste caso, com base no modelo do *IGRF* para a data do aerolevanteamento. O arquivo correspondente aos valores do campo regional foi calculado a partir dos coeficientes descritos no modelo do *IGRF* de 1995 (IAGA 1996) e subtraído dos dados originais. Uma descrição completa do *IGRF*, assim como dos coeficientes para seu cálculo podem ser encontradas em Peddie (1991), Langel (1992) e IAGA (1992 e 1996).

A Figura 8.1 apresenta o mapa do campo regional caracterizado por uma variação suave. Observa-se que o modelo calculado define uma tendência regional aproximadamente plana, não sendo observados alinhamentos magnéticos localizados, cuja subtração aos valores medidos poderia gerar feições espúrias que comprometeriam a interpretação geológica. Como os valores da correção são praticamente constantes, podemos concluir que as anomalias assim obtidas estão, de fato, associadas à variação da magnetização das rochas e não são resultantes de uma representação inadequada do campo magnético regional.

8.3 - TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Os dados radiométricos, registrados em contagens por segundo (cps), foram transformados em partes por milhão (ppm) de eTh e eU (equivalente em tório e urânio, respectivamente) e em porcentagem de K, permitindo uma análise semiquantitativa dos teores obtidos. Conforme mencionado no capítulo 5, não há registro sobre os procedimentos de calibração nos relatórios técnicos do PRV. Desta forma, a conversão foi feita a partir de técnicas de regressão geométrica baseadas em coeficientes calculados a partir de informações pesquisadas em dados de calibração de espectrômetros de levantamentos geofísicos existentes (Amaral & Pascholati 1998). Detalhes sobre os procedimentos para a conversão encontram-se no Capítulo 5.3.3.



Valores aproximados dos coeficientes de sensibilidade utilizados na correção:

- 1) $U = 6.20$
- 2) $Th = 3.70$
- 3) $K = 62.78$

8.4 - GERAÇÃO DAS MALHAS REGULARES

A geração das malhas regulares envolveu uma análise variográfica experimental dos dados geofísicos que permitiu caracterizar e modelar o grau de dependência espacial das variáveis presentes, possibilitando a determinação dos métodos adequados de interpolação. Foram geradas malhas regulares para cada variável incluindo todos os pontos amostrados (ao longo e entre linhas de vôo) através do interpolador vizinho mais próximo, apenas para se obter uma visualização rápida da distribuição espacial dos dados.

Desta forma, a análise foi feita através da observação dos padrões de distribuição das principais feições geofísicas e geológicas da área, sendo considerados quatro azimutes para a construção dos semivariogramas experimentais, conforme consta a seguir.

- Dados magnetométricos
 - Azimute 50° : comportamento estacionário, sem deriva. Observa-se uma homogeneidade na distribuição espacial dos dados.
 - Azimutes 95° , 140° e 185° : comportamento não estacionário com deriva. Presença de anisotropia devido à presença de um alto magnético caracterizado por amplitudes extensas e por um declive gradual nas três direções selecionadas.
- Dados gamaespectrométricos e eletromagnéticos de resistividade aparente
 - Azimute 95° (comportamento estacionário, sem deriva): observa-se uma continuidade na distribuição espacial dos dados, reflexo da presença de um alinhamento de direção $N40^{\circ}W$.

- Azimutes 50° , 140° e 185° (comportamento não estacionário com deriva): existência de variação periódica para distâncias médias de 2 km na distribuição das variáveis nestas direções.

- Dados eletromagnéticos de VLF

- Estes dados apresentam uma quantidade muito alta de ruídos, não sendo possível obter resultados convincentes na análise variográfica. Maiores detalhes sobre os problemas encontrados nestes dados são discutidos no item 8.9.

Uma vez determinado o padrão de distribuição das variáveis e o modelo de ajuste a ser aplicado, as malhas regulares com célula de 30 m foram geradas através do sistema OASIS MontajTM versão 4.3 (Geosoft 1999), como consta a seguir.

- Dados magnetométricos: devido à presença do alto magnético caracterizado por anomalias intensas que cobrem quase 50% da área, a mesma foi dividida em duas partes e submetida a testes separados para calcular os semivariogramas experimentais. Para a parte W, região do alto magnético, o melhor ajuste foi obtido com o modelo de distribuição esférica ao contrário da parte E onde o modelo de distribuição linear forneceu melhores resultados.

O mesmo teste foi realizado para a área inteira, onde os semivariogramas não apresentaram ajustes plenamente satisfatórios para os diversos modelos. O melhor ajuste se deu para o modelo de distribuição esférica. Com base nos resultados obtidos em todos os testes, as três malhas foram geradas e analisadas, juntamente com alguns perfis selecionados. Não foram observadas diferenças significativas nos mapas gerados, tão pouco no padrão estatístico de distribuição das variáveis. Apesar da presença de deriva nas três direções (azimutes 95° , 140° e 185°), a malha regular final foi gerada por krigagem universal com variograma ajustado para um modelo de distribuição esférica.

- Dados gamaespectrométricos e eletromagnéticos de resistividade aparente: foram geradas malhas regulares por krigagem universal com variograma ajustado para um modelo de distribuição linear, relacionado à periodicidade das feições de maior escala presentes na direção N50°E.

Ainda foram testados os algoritmos de interpolação de curvatura mínima e *bitrend* para todas as variáveis geofísicas trabalhadas, mesmo sabendo-se que estes não levam em conta as características não estacionárias de distribuição das variáveis. O resultado foi inferior ao da krigagem, pois esta leva em conta o caráter anisotrópico das variáveis trabalhadas.

8.5 - MICRONIVELAMENTO DOS DADOS

Para minimizar os efeitos dos deslocamentos de nível entre as linhas de vôo, causados pela remoção imperfeita de efeitos causados pela variação diurna do campo geomagnético e eventuais problemas de navegação, diferentes técnicas de micronivelamento foram testadas. Uma discussão sobre os testes e a seleção da técnica mais adequada encontra-se no capítulo 5 (item 5.3.5).

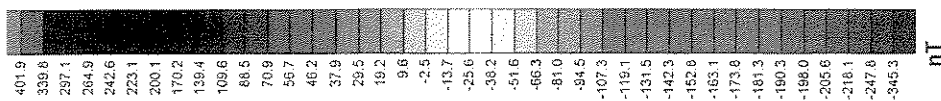
A técnica proposta por Geosoft (1997a) apresentou o melhor desempenho no micronivelamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos por preservar melhor as informações de alta frequência (geológicas) não relacionadas à tendenciosidade gerada pelo desnivelamento das linhas. Para os dados de HEM o micronivelamento apresentou melhor resultado com o método proposto por Huang & Fraser (1999). Os dados de VLF não forneceram resultados satisfatórios mesmo quando micronivelados em função de sua baixa qualidade. As restrições impostas ao seu uso serão comentadas no item 8.9. Os resultados do micronivelamento serão apresentados nos itens referentes à interpretação de cada uma das variáveis trabalhadas.

8.6 - DADOS MAGNETOMÉTRICOS

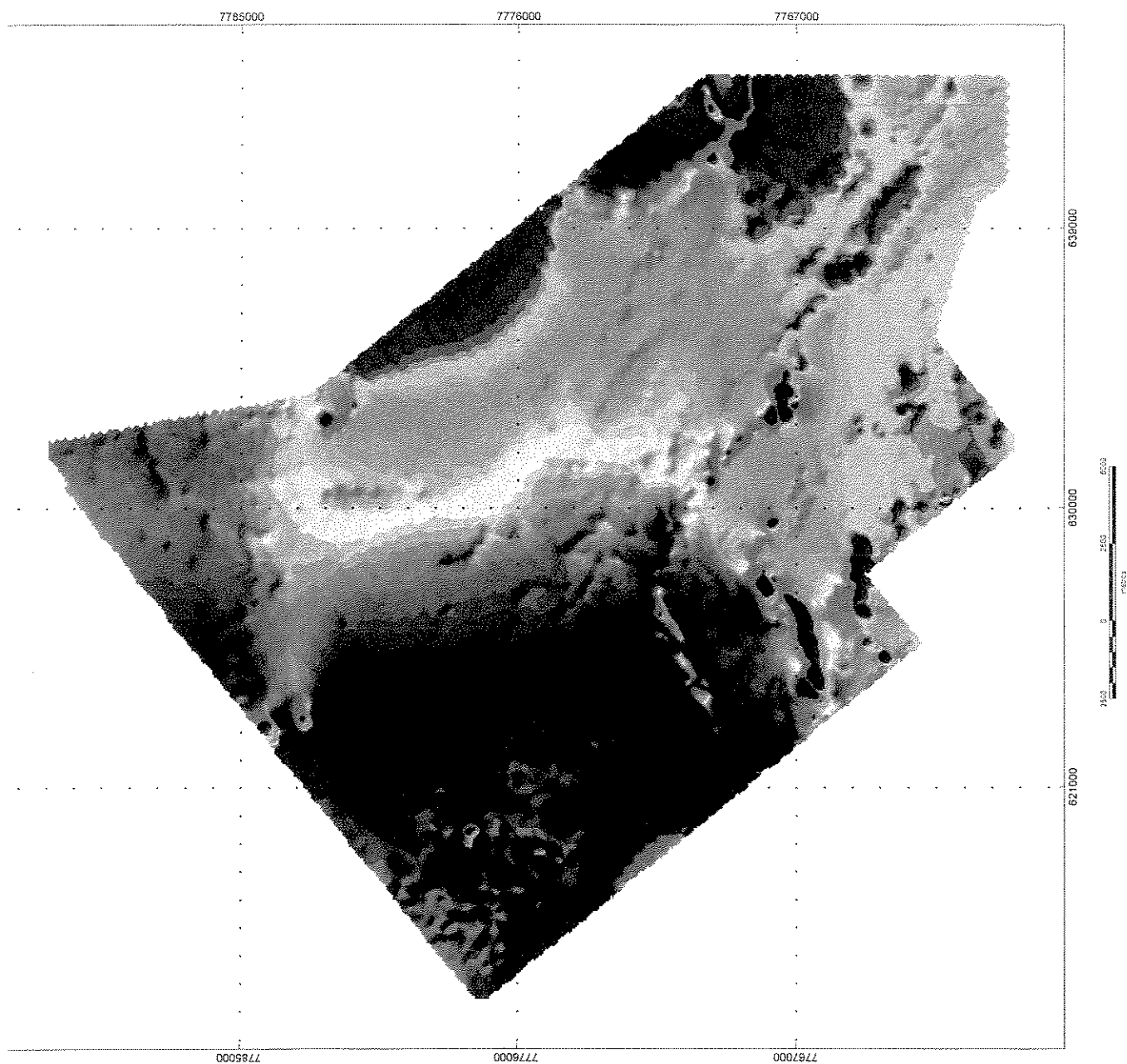
Conforme já mencionado, a assinatura magnética da área de estudo é dominada por anomalias truncadas que mascaram o entendimento e a resolução das fontes superficiais presentes. Esta situação pode ser melhor visualizada e interpretada com base nos resultados dos processamentos dos dados do CGBA (Capítulo 7), cujo levantamento abrange toda a extensão do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. A partir desta avaliação preliminar, foi possível selecionar uma abordagem de tratamento para os dados magnetométricos do PRV, com o suporte dos testes em anomalias sintéticas (Capítulo 6). A seguir, são apresentados os resultados referentes às etapas de processamento, de análise integrada e interpretação destes dados.

A Figura 8.2 apresenta o mapa de intensidade do campo magnético total original, onde se observam algumas feições espúrias ao longo das linhas de vôo dos blocos II e III (direção N50°E) devido a erros residuais de nivelamento. Mesmo sendo pequenos, esses erros tendem a se amplificar durante a aplicação dos processamentos de imagens subseqüentes, especialmente aqueles envolvendo derivadas. O mapa de intensidade do campo magnético total micronivelado pode ser observado na Figura 8.3, onde foi removida a tendenciosidade ao longo das linhas de vôo sem, entretanto, distorcer as feições gerais das anomalias dos dados originais.

Após a redução dos dados, diversas transformações foram aplicadas com o objetivo de gerar produtos secundários apropriados para análise e interpretação, bem como remover alguns ruídos existentes e realçar anomalias relativas a alvos geológicos e feições estruturais. Os resultados foram interpretados tendo como base imagens coloridas simples e de relevo sombreado. A seguir serão discutidos os resultados da aplicação das técnicas de realce utilizadas de acordo com os objetivos propostos em cada caso.



nt



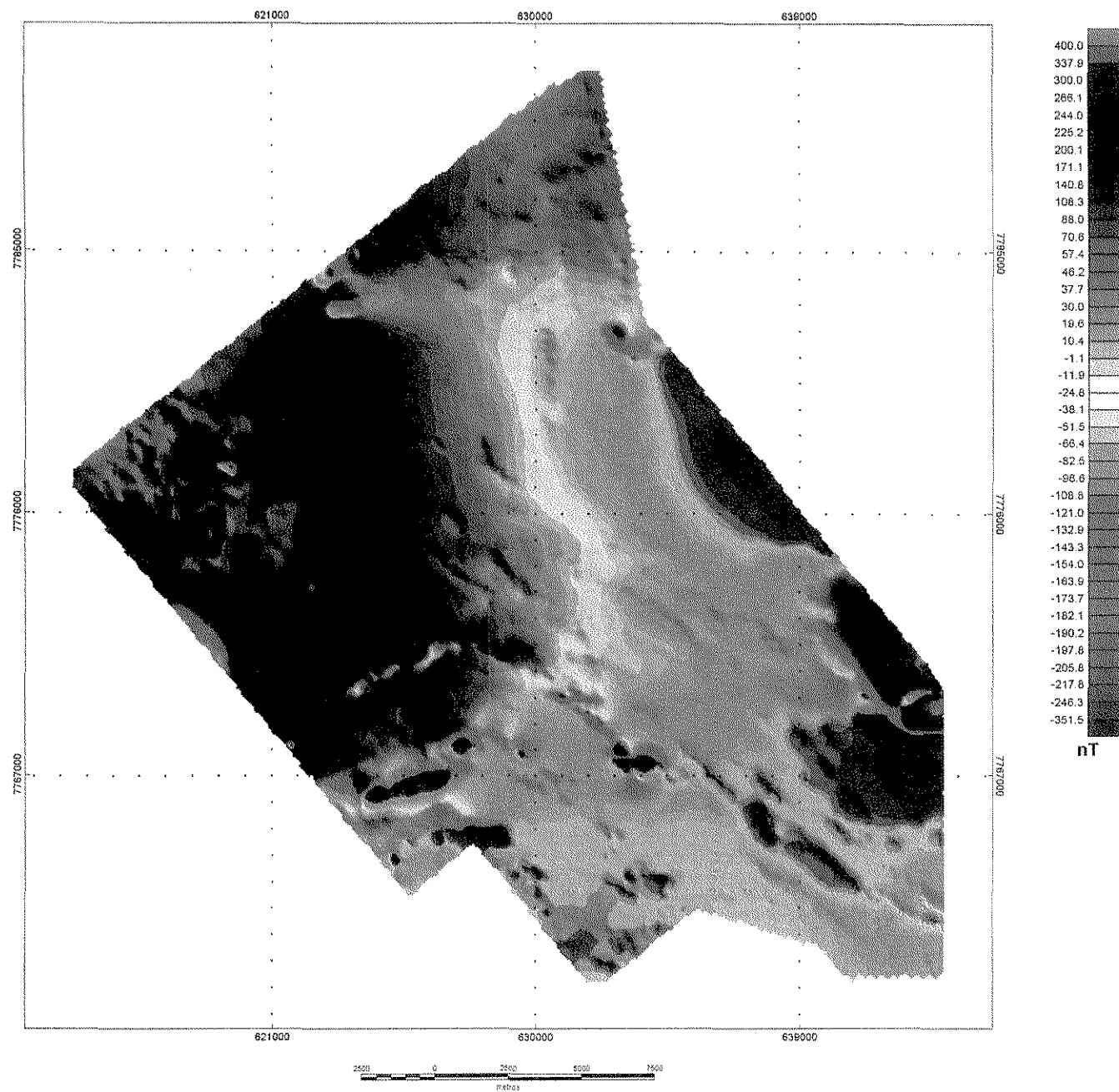


Figura 8.3 - Mapa de intensidade do campo magnético total micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

8.6.1 - CÁLCULO DO ESPECTRO DE POTÊNCIA

Nesta etapa, foi calculado o espectro de potência para a porção central do Quadrilátero Ferrífero com base nas respostas obtidas nos testes sintéticos realizados no Capítulo 6. A Figura 8.4 apresenta o espectro de potência radial médio da área investigada, indicando contribuições de três conjuntos de fontes com profundidades variadas:

- 1) 2 km de profundidade máxima (posicionamento entre 0,01 a 0,8 ciclos/km).
- 2) 1 km de profundidade média (posicionamento entre 1,2 a 2 ciclos/km).
- 3) 0.5 km de profundidade média (posicionamento entre 2 a 4,5 ciclos/km).

A presença de anomalias na borda da janela de dados magnetométricos do PRV restringiu a localização do topo de fontes profundas, devido à sua estratégia de isolar ao máximo as influências das respostas das ffbs do SGM e de fontes regionais. Esta restrição foi demonstrada nos testes sintéticos (Capítulo 6) simulados para os efeitos no espectro de potência causados por anomalias truncadas (item 6.2).

Apesar das restrições mencionadas acima, os resultados obtidos serviram de apoio para avaliar a profundidade mínima para o topo das fontes profundas da área.

8.6.2 - MAPA DE INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO

A Figura 8.3 apresenta o mapa de intensidade do campo magnético total caracterizado por anomalias truncadas geradas por fontes externas à janela de dados, que interferem nos padrões das fontes mais superficiais. O caráter regional das anomalias truncadas é confirmado nos mapas de intensidade de campo magnético do CGBA (Figura 7.1, anomalia 5) e de gradiente vertical (Figura 7.4, anomalias 4, 5 e 6).

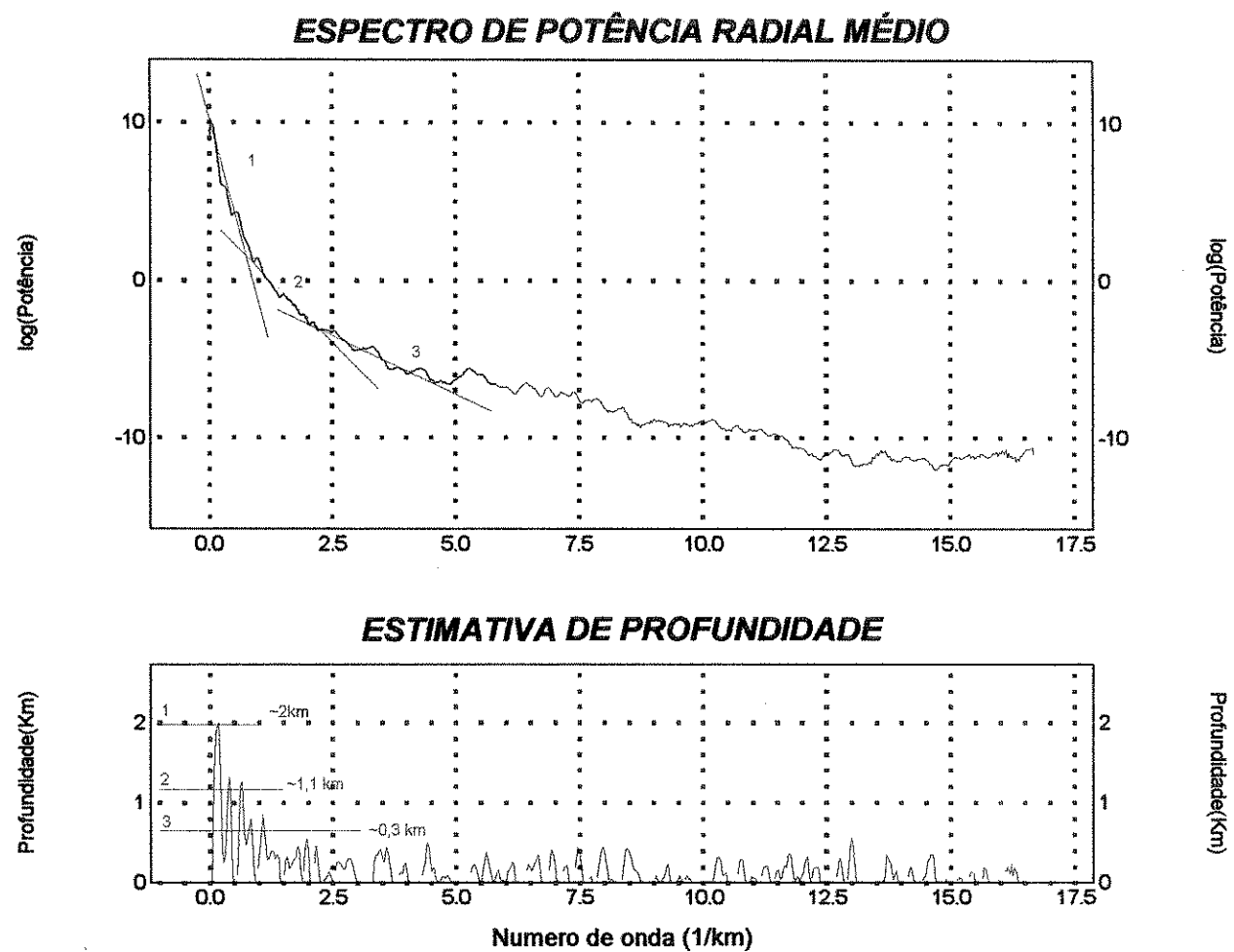


Figura 8.4 - Espectro de potência radial médio da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

Estas anomalias são caracterizadas por sinais de maior comprimento de onda que se sobrepõem a um relevo magnético perturbado, bem caracterizado nos processamentos que serão apresentados a seguir.

8.6.3 - FILTRO DE REDUÇÃO AO PÓLO

A aplicação do filtro de redução ao pólo teve como objetivo inicial simplificar a interpretação dos dados magnéticos, posicionando as anomalias diretamente sobre suas fontes causativas (ver item 5.3.7.2). Os dados magnetométricos foram reduzidos ao pólo a partir da malha de anomalias de campo total levando-se em conta os seguintes parâmetros:

- inclinação magnética: $-28,6^{\circ}$,
- declinação magnética: $-20,7^{\circ}$,
- inclinação de correção de amplitude: $-28,0^{\circ}$.

O mapa de anomalias reduzidas ao pólo (Figura 8.5) não apresentou resultados totalmente satisfatórios. Conforme já avaliado nos testes sintéticos de aplicabilidade desse filtro (Capítulo 6, item 6.4), a correção de amplitude aplicada para a latitude de $-28,6^{\circ}$ não regularizou todas as instabilidades numéricas geradas nessa transformação.

O mapa filtrado apresenta ruídos e distorções na direção NNW-SSE (direção da latitude magnética) nas anomalias truncadas nas porções E e SW da janela de dados (comparar com a Figura 8.3). Essa situação é prevista no Capítulo 6.4, onde anomalias ideais, simuladas nas mesmas condições de inclinação magnética mostram uma distorção significativa na direção do N magnético (Figuras 6.4, 6.5 e 6.6), principalmente quando a fonte é mais profunda.

Dessa forma, optou-se por interpretar os dados magnetométricos do PRV dando menor peso ao mapa reduzido ao pólo, evitando-se, assim, possíveis propagações de erros na interpretação geológica ou de distorções em filtragens subsequentes.

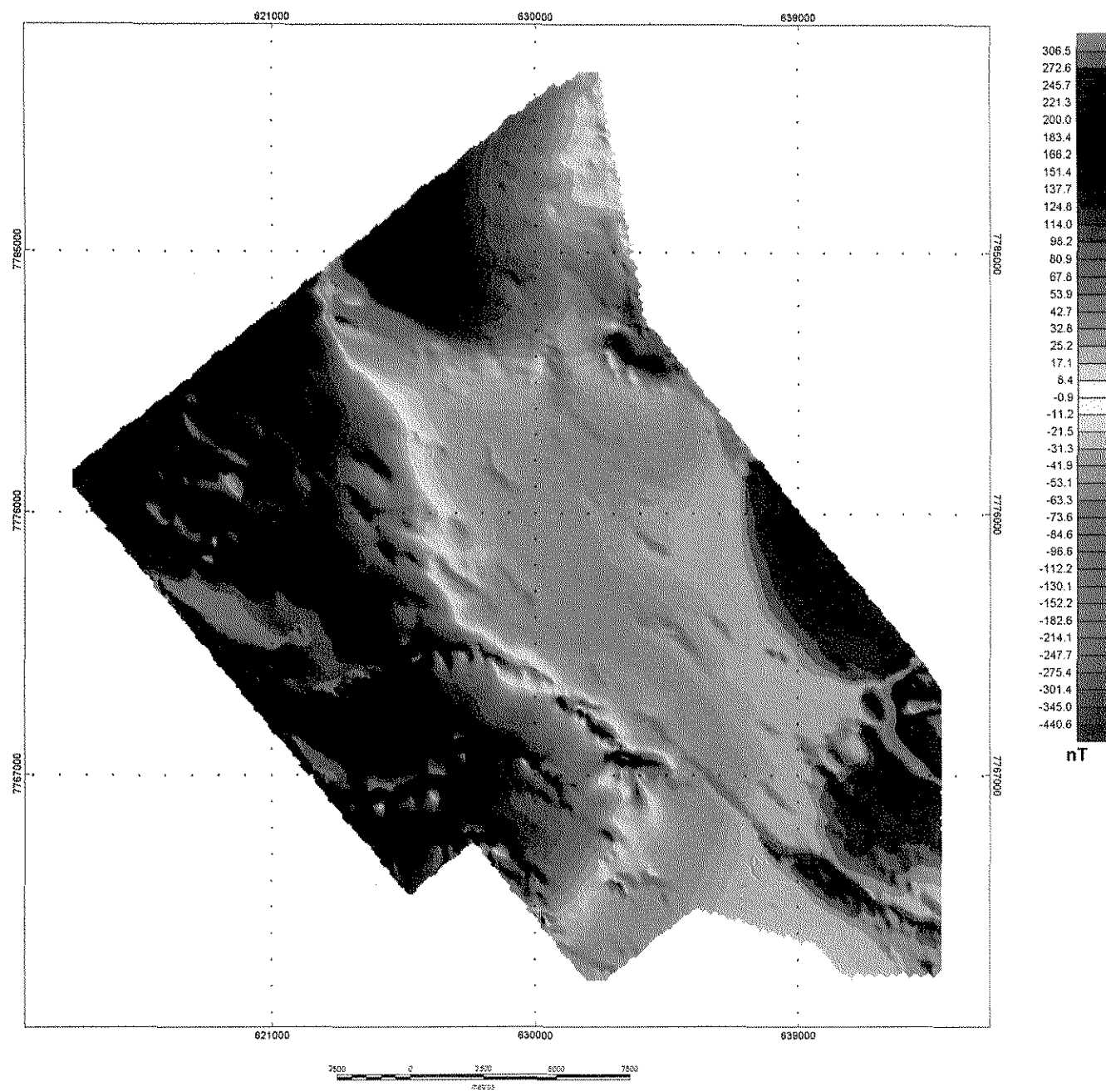


Figura 8.5 - Mapa de intensidade do campo magnético total reduzido ao pólo da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

Assim, para guiar a interpretação qualitativa, adotou-se como referência o caráter bipolar esperado para anomalias nesta latitude magnética ($-28,6^\circ$) que apresentam pólo negativo na parte sul e positivo na parte norte. Este “padrão normal” de anomalias ocorre associado a fontes com magnetização predominantemente do tipo induzido. Além deste característico padrão bipolar, observa-se, nesta latitude, que o pólo negativo é mais localizado e o positivo bem mais espalhado no lado norte das fontes magnéticas.

Mediante tais restrições, foi possível fazer apenas uma análise geral do padrão das respostas magnéticas das unidades presentes na área, onde predomina uma forte influência regional confirmada pela interpretação dos dados do CGBA (Capítulo 7).

Como foi discutido no Capítulo 7, essa influência de fontes externas está associada às contribuições das ffb's das rochas metassedimentares do Grupo Itabira (SGM), bem como de fontes mais profundas (em torno de 13 km) da crosta terrestre.

8.6.4 – MAPA DE PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TOTAL

Para remover a influência das anomalias provenientes de fontes mais profundas, foi aplicado o filtro de derivada vertical, onde diversos alinhamentos magnéticos superficiais passaram a ser individualizados. De uma forma geral, os resultados obtidos mostraram uma boa correspondência com os principais alinhamentos estruturais da área. A delimitação destes alinhamentos, bem como das fontes magnéticas correspondentes a unidades geológicas, ficou restrita em função do filtro de primeira derivada vertical ter sido aplicado diretamente sobre os dados de intensidade magnética total. Desta forma, optou-se por dividir a área em domínios gerais e destacar as anomalias mais relevantes, conforme mostra a Figura 8.6, deixando a interpretação mais detalhada para os resultados do cálculo da amplitude do sinal analítico. Uma avaliação mais detalhada das estruturas presentes pode ser feita sobrepondo a transparência referente ao mapa geológico da área ao mapa de gradiente vertical. Os domínios magnéticos foram divididos na Figura 8.6 da seguinte forma:

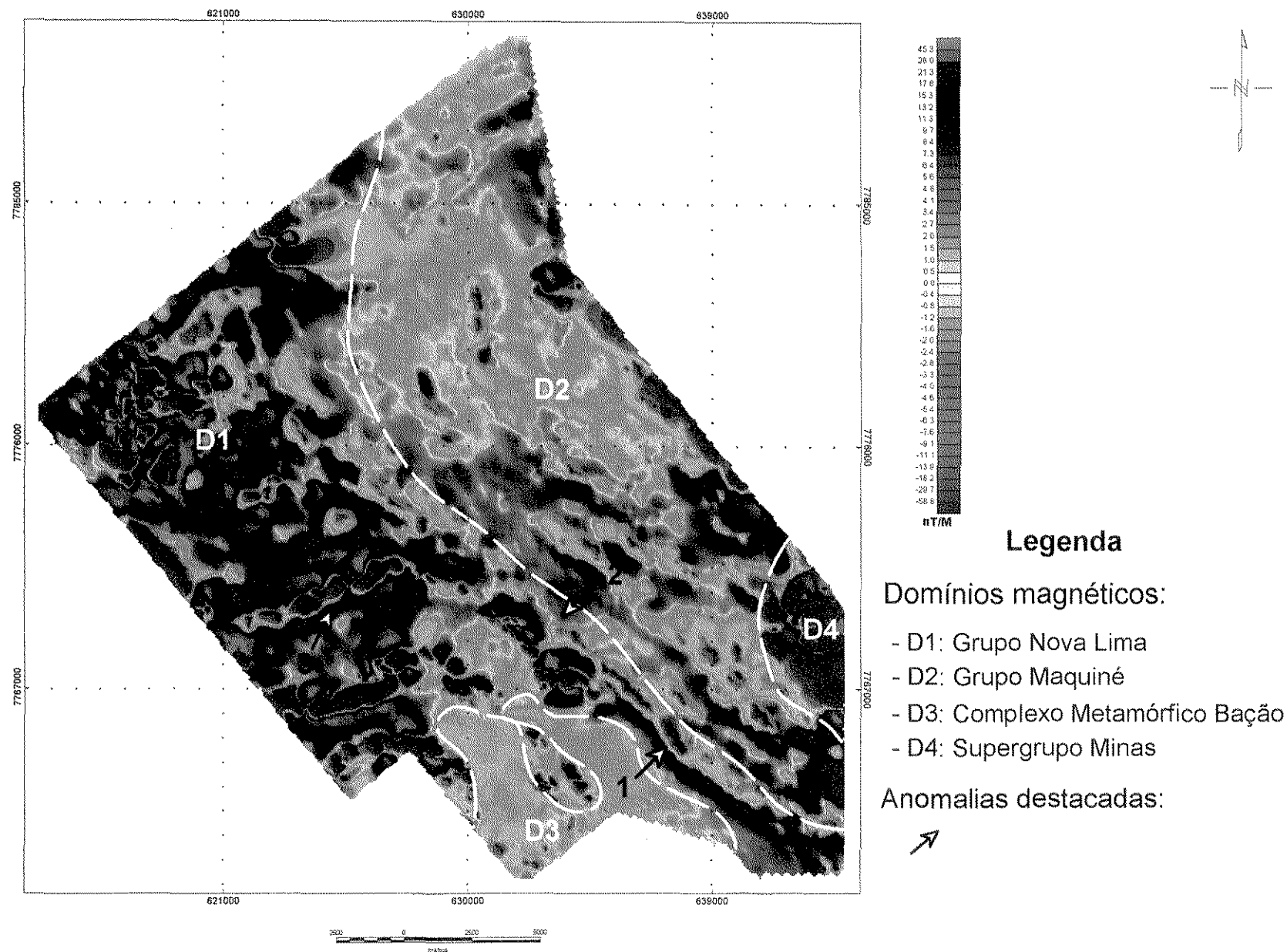


Figura 8.6 - Mapa do gradiente vertical da intensidade do campo magnético total.
Porção Central do Quadrilátero Ferrífero (ver legenda do mapa geológico na Figura 2.4).

- Domínio 1 (D1): caracterizado por anomalias de alta frequência que cortam toda a extensão da área na direção geral NW-SE. O relevo magnético é bastante perturbado e apresenta uma boa correspondência com as unidades do GNL. As anomalias distribuem-se em faixas magnetizadas e representam contatos tectônicos por falhamentos de empurrão. Algumas feições magnéticas merecem destaque, entre elas, as anomalias 1, 2 e 3. Essas anomalias encontram-se ao longo do LSV (ver os contatos geológicos na transparência referente à Figura 2.4 numa extensão de, aproximadamente, 10 Km. Nessa porção do lineamento observa-se uma anomalia com pólo positivo ao sul e pólo negativo ao norte indicando um padrão reverso de magnetização bastante realçado pela derivada vertical. Percebe-se que essa porção está associada à maior concentração de minas (Lavras Morro São Vicente, Paciência, Fazenda do Cedro e Monge) e os maiores teores de ouro da área (ver item 2.6, e Tabela 2.3). Este padrão reverso desaparece na porção central desta anomalia (Figura 8.6, número 2). Neste ponto o alinhamento magnético segue com padrão normal de magnetização na direção NW-SE (Figura 8.6, números 6, 7, 8 e 9), também infletindo em várias direções entre WSW (Figura 8.6, números 5 e 10) e SW, contornando os limites do CMB (Figura 8.6, números 4 e 5). Ao que parece, existe correlação entre o padrão reverso da anomalia e maior número de ocorrências de ouro sugerindo que estes dois fatores tenham sido gerados num mesmo processo geológico.

- Domínio 2 (D2): o domínio D2 é caracterizado por um relevo magnético mais suave, perturbado por alinhamentos magnéticos superficiais de direção geral NW-SE e está associado às unidades quartzíticas e menos magnéticas do GM. A Unidade Rio de Pedras (rp) representa a Formação Palmital, originada num ambiente litorâneo por sedimentos quartzosos e micáceos. As unidades Jaquara (j) e Chica Dona (c) representam as porções mais grosseiras de um ambiente fluvial, com sedimentos quartzosos e conglomeráticos. As faixas magnetizadas representam contatos tectônicos

por falhamento de empurrão e zonas de cisalhamento presentes na área. Neste aspecto, o LSV destaca-se no contato entre os domínios D2 e D1. Observa-se que a intensidade de magnetização dessas faixas não é contínua e apresenta maiores valores nas partes central e sul desse domínio. Tais porções podem corresponder a regiões de maior concentração de fluidos com minerais ferromagnéticos.

- Domínio 3 (D3): caracterizado por um relevo magnético não perturbado, está associado às unidades do Complexo Metamórfico Bação;
- Domínio 4 (D4): caracterizado por um relevo magnético bastante perturbado, com anomalias alongadas de grande amplitude associadas às unidades magnéticas do SGM.

8.6.5 – MAPA DE AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO

Mapas de sinal analítico subsidiam a interpretação dos produtos gerados por processamento, como os até agora obtidos (derivadas e redução ao pólo). Para a latitude magnética da área investigada o sinal analítico representou uma alternativa às instabilidades ocorridas na aplicação do filtro de redução ao pólo, em função da presença de remanescência e de latitude magnética relativamente baixa ($-28,6^\circ$). Os efeitos causados por diferentes posicionamentos de fontes foram simulados e discutidos no Capítulo 6 (item 6.5) e são apresentados na Figura 6.8, fornecendo o suporte necessário à interpretação dos resultados reais. Além disso, alguns ruídos realçados nesse processamento foram removidos com a aplicação de um filtro de continuação para cima. A altura utilizada na continuação corresponde à metade do espaçamento entre as linhas de vôo (125 m) e foi selecionada a partir do desempenho obtido nos testes sintéticos realizados no Capítulo 6.5.

A Figura 8.7 apresenta o mapa de amplitude do sinal analítico calculado a partir dos dados de intensidade do campo magnético total. A interpretação destes dados permitiu separar a área em quatro domínios:

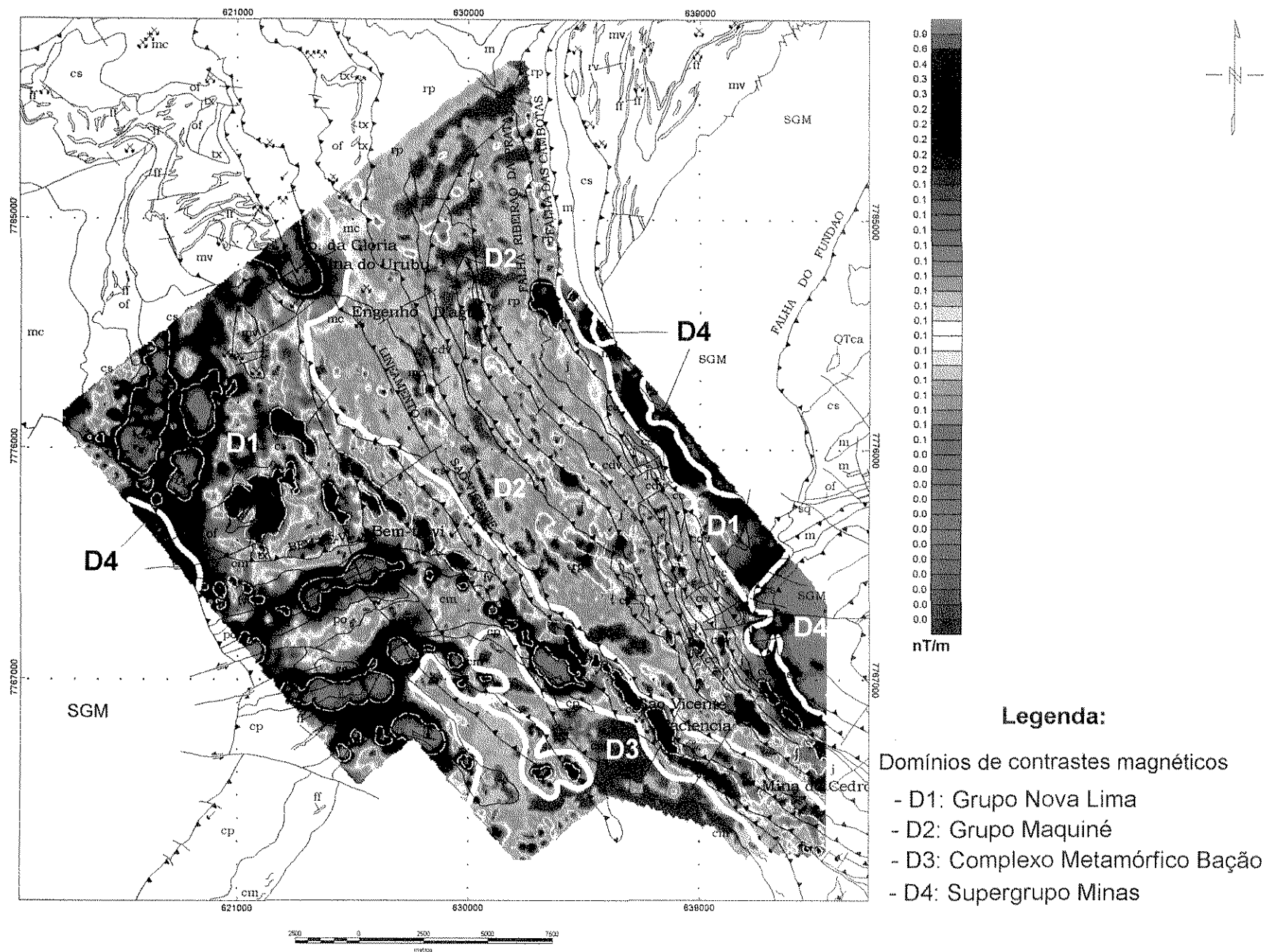


Figura 8.7 - Mapa de amplitude do sinal analítico com contatos geológicos sobrepostos.

Porção Central do Quadrilátero Ferrífero (ver legenda do mapa geológico na Figura 2.4).

- Domínio 1 (D1): é caracterizado por valores médios a altos de amplitude do sinal analítico e associado às ffb's presentes nas rochas metavulcano-sedimentares do GNL (comparar com Figura 2.4). É possível individualizar algumas unidades representantes do magmatismo máfico-ultramáfico na porção SW da área: a Unidade Ouro Fino (of) com ocorrência localizada de espessas camadas de ffb e as rochas serpentinizadas da Unidade Córrego dos Boiadeiros (cb). Este domínio também ocorre na porção SE da área dentro dos limites da Unidade Mindá, uma associação metassedimentar química pelítica. Os valores médios de amplitude de sinal analítico dessas rochas são devidos à presença das ffb's do SGM, que se encontram cavalgadas em contato tectônico sobre suas estruturas. Ainda se observam três alinhamentos aproximadamente concêntricos e descontínuos com máximos de sinal analítico contornando os limites do CMB. Tais alinhamentos relacionam-se às ffb's presentes nas unidades Catarina Mendes, Córrego da Paina e Pau D'Óleo. Observa-se um conjunto de máximos formando um alinhamento bastante destacado de direção geral NW-SE que corta toda a extensão da área. A sua porção S associa-se ao LSV e ocorre no limite entre as unidades do GNL (abaixo do limite/D1) e do GM (acima do limite/D2). Na sua porção N o alinhamento magnético inflete para WSW, cortando os litotipos da Unidade Córrego do Sítio (GNL) e o LSV perde a expressão de sinal analítico. Não há registro de ocorrência expressiva de ffb ao longo desta feição NW-SE, sendo provável a ocorrência de material magnético em maiores ou menores concentrações ao longo de descontinuidades estruturais representadas pelos falhamentos existentes;

- Domínio 2 (D2): caracterizado por valores baixos a médios de amplitude do sinal analítico associados às rochas metassedimentares predominantemente quartzíticas pertencente ao GM (SGRV). Embora os valores de amplitude não sejam tão elevados como no domínio D1, há

indícios de corpos magnéticos superficiais ou sub-superficiais nesta área alinhados na direção geral NW-SE. Tais alinhamentos possuem uma boa correspondência com aos falhamentos presentes na ZCSV e podem estar caracterizando espaços preenchidos por material magnético em diversas porções superficiais de empurrão desta estruturação;

- domínio 3 (D3): domínio sem expressão de amplitude do sinal analítico, associada ao Complexo Metamórfico Bação. Observam-se três máximos associados a corpos magnéticos subjacentes ou na vizinhança do complexo. Estes corpos estão localizados próximos aos limites entre o Bação e a Unidade Catarina Mendes, sendo que um deles encontra-se no contato com esta última unidade;

- Domínio 4 (D4): caracteriza-se por altos valores de amplitude de sinal analítico e está associado às ffbs do SGM.

Discussão:

O estilo estrutural do Quadrilátero Ferrífero é fruto de uma história complexa de superposição de eventos compressivos e distensivos, hoje em dia registrada por extensas zonas de cisalhamento com vários estilos de dobramentos, falhamentos e inversões tectônicas, além de outras características. Esta arquitetura se traduz no padrão das respostas magnéticas, influenciado pelas ffbs presentes nas unidades metassedimentares do SGM e, secundariamente, pelas unidades do GNL. O conteúdo magnético destas rochas, tanto em superfície quanto em profundidade, interfere nos padrões anômalos locais, principalmente quando as anomalias resultantes encontram-se truncadas nas bordas da janela de dados correspondente à área estudada. Além disso, a presença de remanescência em alguns locais e o valor relativamente baixo da latitude magnética da região condicionam os padrões das anomalias magnéticas, induzindo a interpretações errôneas em alguns processamentos.

Conforme demonstrado nos testes de aplicabilidade do filtro de redução ao pólo (Capítulo 6.4), as anomalias profundas, truncadas ou não, são centralizadas sobre suas respectivas fontes, embora sejam gerados pólos negativos artificiais que as mantêm assimétricas. A presença dessas fontes influencia o padrão das anomalias rasas, distorcendo-as da mesma forma. Além disso, os ruídos presentes, são realçados na direção do norte magnético em todas as situações mencionadas acima. Esta situação ocorre no mapa de intensidade do campo magnético reduzido ao pólo. A anomalia regional localizada na porção W da área apresenta-se truncada e distorcendo boa parte das demais anomalias. Observam-se ruídos realçados na direção do norte magnético, principalmente nos domínios da anomalia truncada, que distorcem as anomalias associadas às ffb's, serpentinitos e aos alinhamentos magnéticos, induzindo a erros de interpretação.

O mapa de gradiente vertical indicou a presença de remanescência na porção S do LSV, onde ocorre uma concentração significativa de escavações de prospecção e lavra de ouro e estão registrados teores em ouro estimados em algumas centenas de g/t, chegando a 10-15 g/t na camada de minério. Este padrão reverso desaparece na porção N do lineamento, sugerindo um preenchimento com materiais diversos ao longo de seus planos de falha. Os alinhamentos que contornam o CMB estão associados às ffb's presentes nas unidades metassedimentares do GNL.

O mapa de amplitude do sinal analítico apresenta um excelente desempenho e auxilia na interpretação dos mapas de primeira derivada vertical e, principalmente, de redução ao pólo pelos motivos já mencionados. As ambigüidades apresentadas na interpretação dos valores de amplitude de algumas situações, como fontes estreitas ou próximas, são resolvidas a partir dos testes realizados no item 6.5 e não invalidam o uso desta técnica. A presença de ruídos realçados nesse processamento é atenuada com a aplicação criteriosa de filtros de continuação para cima.

Os resultados obtidos da interpretação dos valores de amplitude do sinal analítico delimitam claramente o contato entre os domínios essencialmente magnéticos característicos das unidades inferior e média do GNL e os domínios não magnéticos representados pelas rochas essencialmente quartzíticas do GM. Os domínios magnéticos são devidos à presença de ffb's, de rochas serpentinizadas ou de minerais

magnéticos em zonas de falhas. As diversas falhas presentes na ZCSV são preenchidas de forma descontínua por material magnético, possivelmente, ao longo das superfícies de empurrão. A principal estrutura, o LSV, pode ser delimitada facilmente na sua porção S. No entanto, na porção N perde suas características magnéticas de reversão, sugerindo a presença de um sistema fechado ou o preenchimento dos espaços por outro material, talvez em eventos diferentes. O alinhamento de corpos magnéticos iniciado na porção S do LSV possui uma direção N50°W, observando uma continuidade em toda a extensão da área, infletindo entre 60°-70° para W deste lineamento.

Dados de campo confirmam uma distribuição de magnetita bem formada e achatada segundo o plano de foliação N50°W na porção SE desta zona de cisalhamento, restrita às proximidades das minas São Vicente e Paciência. Nesta mesma direção observam-se veios de quartzo preenchendo fraturas de extensão de direção NE-SW, além de raras e pequenas lentes (3 cm de largura) de ffb intercaladas na foliação, inexpressivas na escala do levantamento geofísico.

8.7 - DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Os levantamentos aerogamaespectrométricos envolvem a medição física da radiação gama através do registro da variação geoquímica de potássio (K) e dos equivalentes de urânio (eU) e tório (eTh) nos primeiros 30 cm da superfície da Terra (Dickson & Scott 1997). Os dados resultantes são utilizados como subsídio ao mapeamento litológico, embora as variações sutis das respostas gamaespectrométricas, muitas vezes indicativas de mineralização, sejam mais difíceis de interpretação.

De uma forma geral, as respostas gamaespectrométricas apresentam uma boa correlação com unidades geológicas principais e as variações dentro dessas unidades podem corresponder a variações litológicas e a diferentes estilos de intemperismo local. Durante o intemperismo, os radioelementos são liberados, redistribuídos e incorporados ao regolito, que muitas vezes, difere nas características radiométricas das rochas-fonte em função de sua reorganização textural e geoquímica (Wilford *et al.* 1997). Um exemplo seria o comportamento do K, que sofre depleção ao ser lixiviado de materiais alterados, acompanhada por elevados valores de eTh e eU retidos em argilas e óxidos de ferro.

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados da interpretação dos dados gamaespectrométricos da área de estudo de forma a atingir os seguintes objetivos: avaliar o desempenho dos radioelementos na individualização das principais unidades geológicas e caracterizar as respostas gamaespectrométricas das mineralizações auríferas presentes, em especial, dos depósitos das Lavras de São Vicente, que aparecem associados a uma feição magnética característica indicativa de forte remanescência e com valores relativamente altos de amplitude do sinal analítico (Item 8.6). Uma melhor visualização dos resultados aqui discutidos pode ser feita utilizando-se a transparência referente ao mapa geológico da área de estudo (Figura 2.4) anexado na contracapa desse volume.

8.7.1 - MAPA DE CONTAGEM TOTAL

A Figura 8.8 apresenta o mapa de contagem total (CT) original, onde se observam algumas feições espúrias ao longo das linhas de vôo devido a erros residuais de nivelamento das linhas.

A Figura 8.9 mostra os resultados do micronivelamento, onde é removida a tendenciosidade ao longo das linhas de vôo sem distorcer, entretanto, o padrão das anomalias dos dados originais.

O mapa de CT mostra razoável correlação com o mapa geológico elaborado pela CPRM (1996). Os resultados podem ser melhor visualizados comparando-se a Figura 8.9 e a Figura 2.4 (mapa geológico da área). As maiores contagens encontradas na área representam os litotipos granito-gnássicos do CMB com medidas superiores a 800 cps.

A associação máfica ultramáfica de composição tholeítica a komatiítica, base do GNL, possui uma boa correspondência com os resultados gamaespectrométricos, sendo caracterizada pelos mais baixos teores de CT da área. Os valores variam entre 180 e 270 cps nas unidades Ouro Fino e Córrego dos Boiadeiros, e entre 270 e 450 cps na Unidade Morro Vermelho.

A associação metavulcano-sedimentar clástica, representada na área pela Unidade Mestre Caetano, corresponde a teores que variam entre 390 e 700 cps. Esses representantes da Unidade média do GNL são caracterizados por um estágio avançado de alteração hidrotermal (Capítulo 2.4.2) e não apresentam uma resposta radiométrica específica que permita a sua individualização.

De uma forma geral, as unidades químico-clásticas superiores do GNL possuem teores médios de CT. Tais teores variam de 360 a 500 cps na Unidade Fazenda Velha, 350 a 565 cps na Unidade Córrego da Paina, 400 a 700 cps na Unidade Mindá e 330 a 580 cps na Unidade Córrego do Sítio. A Unidade Catarina Mendes apresenta uma exceção, com valores inferiores variando entre 270 e 350 cps. Mais uma vez, o controle estrutural que permeia os estilos de alteração hidrotermal na área, dificulta a individualização dessas unidades.

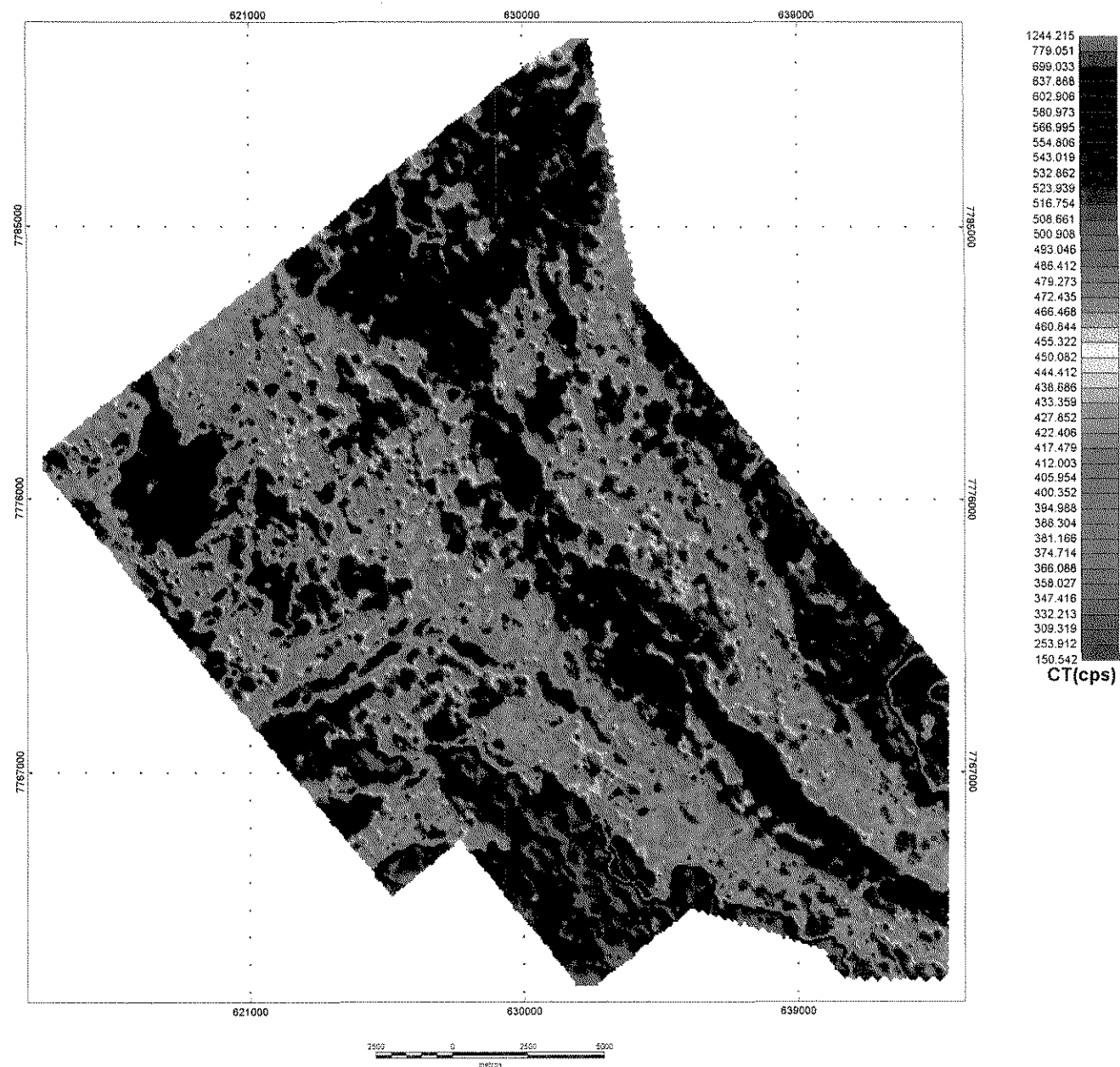


Figura 8.8 - Mapa de contagem total original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

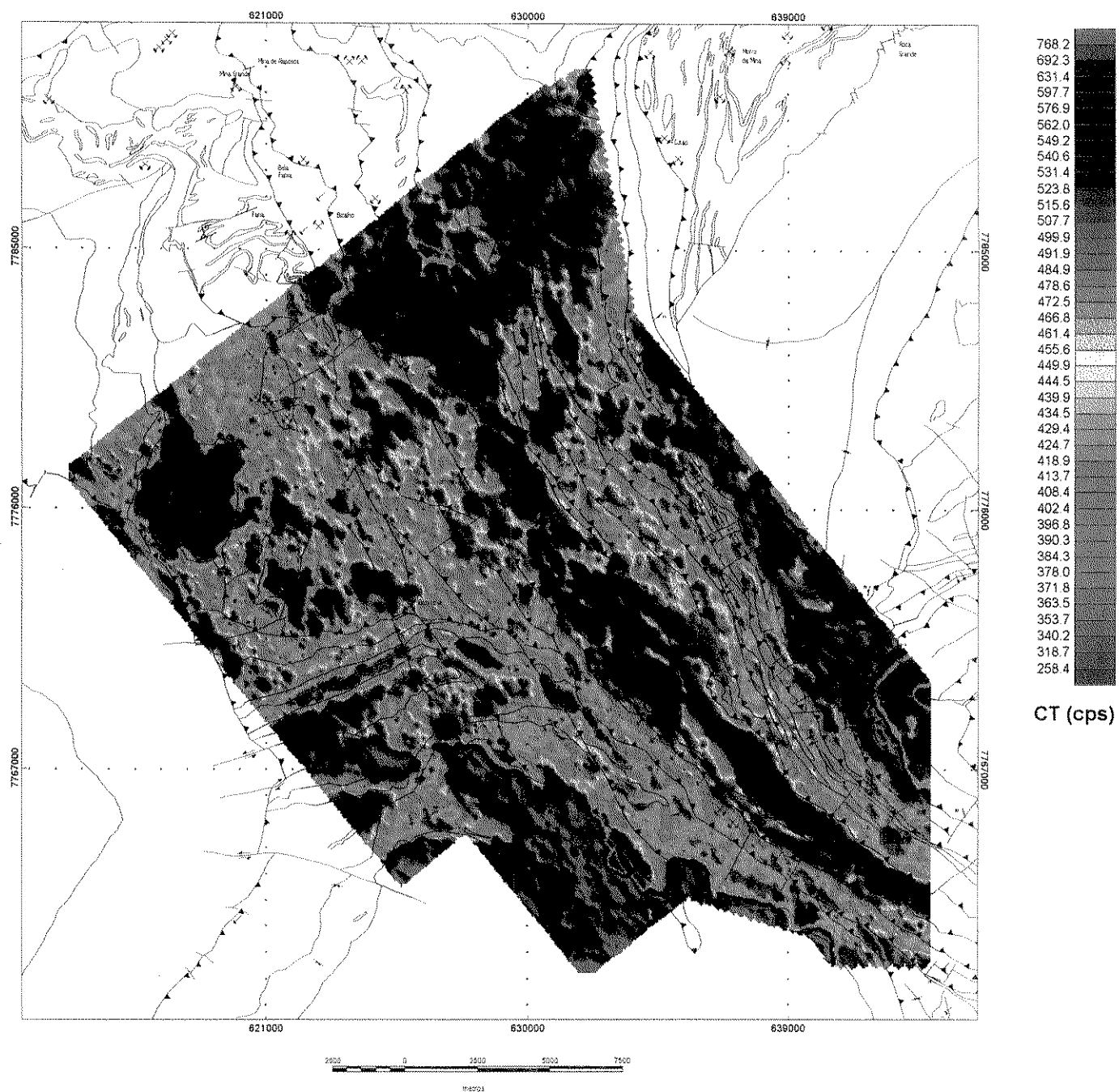


Figura 8.9. Mapa de contagem total micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero

Esse fato é muito bem apresentado no mapa de CT, onde se observa uma forte estruturação geral de direção N50°W, semelhante à direção dos principais alinhamentos magnéticos detectados pela magnetometria (Figuras 8.6 e 8.7). Essa estruturação inflete para a direção W na porção central da área.

8.7.2 - MAPA DO POTÁSSIO

As Figuras 8.10 e 8.11 apresentam os mapas de K original e micronivelado, respectivamente. Algumas feições espúrias ao longo das linhas de vôo devido a erros residuais de nivelamento do vôo foram removidas sem distorcer as feições básicas apresentadas pelos dados originais.

O K é o radioelemento mais afetado nos processos de alteração hidrotermal em rochas hospedeiras de mineralizações auríferas em muitos casos apresentando um halo detectável nos levantamentos gamaespectrométricos. Seus valores podem chegar até o dobro da concentração original (Hoover & Pierce 1990). No entanto, a simples presença de K em concentrações anômalas, não constitui um atributo associado a um processo de mineralização. Savosin *et al.* (1977) discutem os resultados de um levantamento gamaespectrométrico de campo em seqüências vulcânicas e vulcano-sedimentares paleozóicas, onde os veios de ouro se encontram-se associados a baixos teores de todos os três radioelementos.

Na presente área, o mapa de K contribui com a delimitação das áreas afetadas por fenômenos geológicos associados ao enriquecimento desse elemento, revelando uma boa correspondência com as ocorrências de alteração hidrotermal das unidades descritas nos relatórios do mapeamento geológico realizado por Signorelli *et al.* (1993) (ver descrição geológica no Capítulo 2). No entanto, não é observada uma boa correspondência com os litotipos cartografados pelos mesmos autores, à exceção das unidades máfica-ultramáficas que apresentam concentrações extremamente baixas de K (teores de 0,12 a 0,27%).

Da mesma forma que no mapa de CT, se observa uma estruturação geral de direção N50°W no mapa de K, destacando uma forte concentração desse elemento na porção central da área, com teores que variam de 0,65 a 1,04 %.

$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{5}$

[illegible]

$\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840. 84

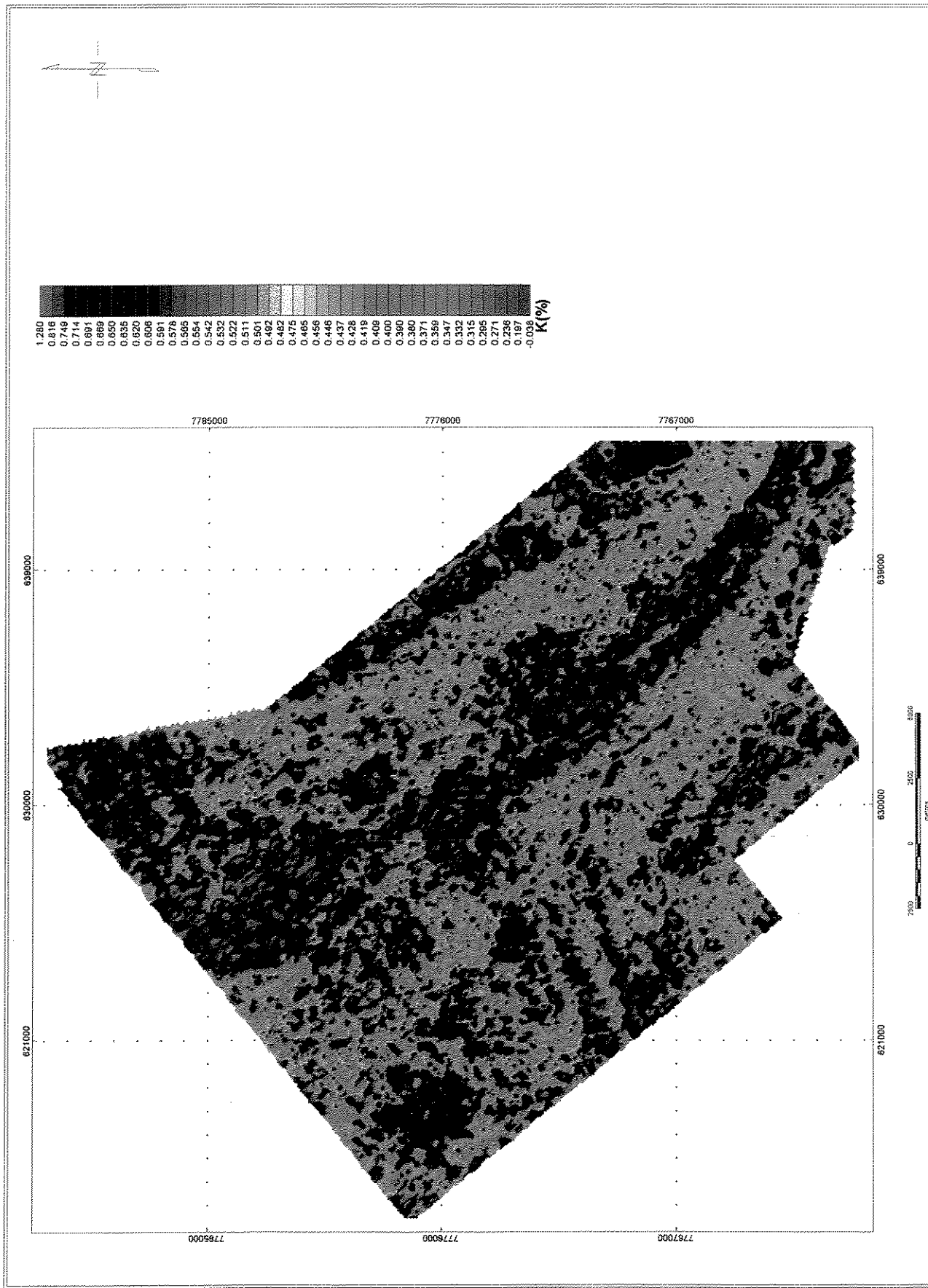


Figura 8 10 - Mapa de potássio original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

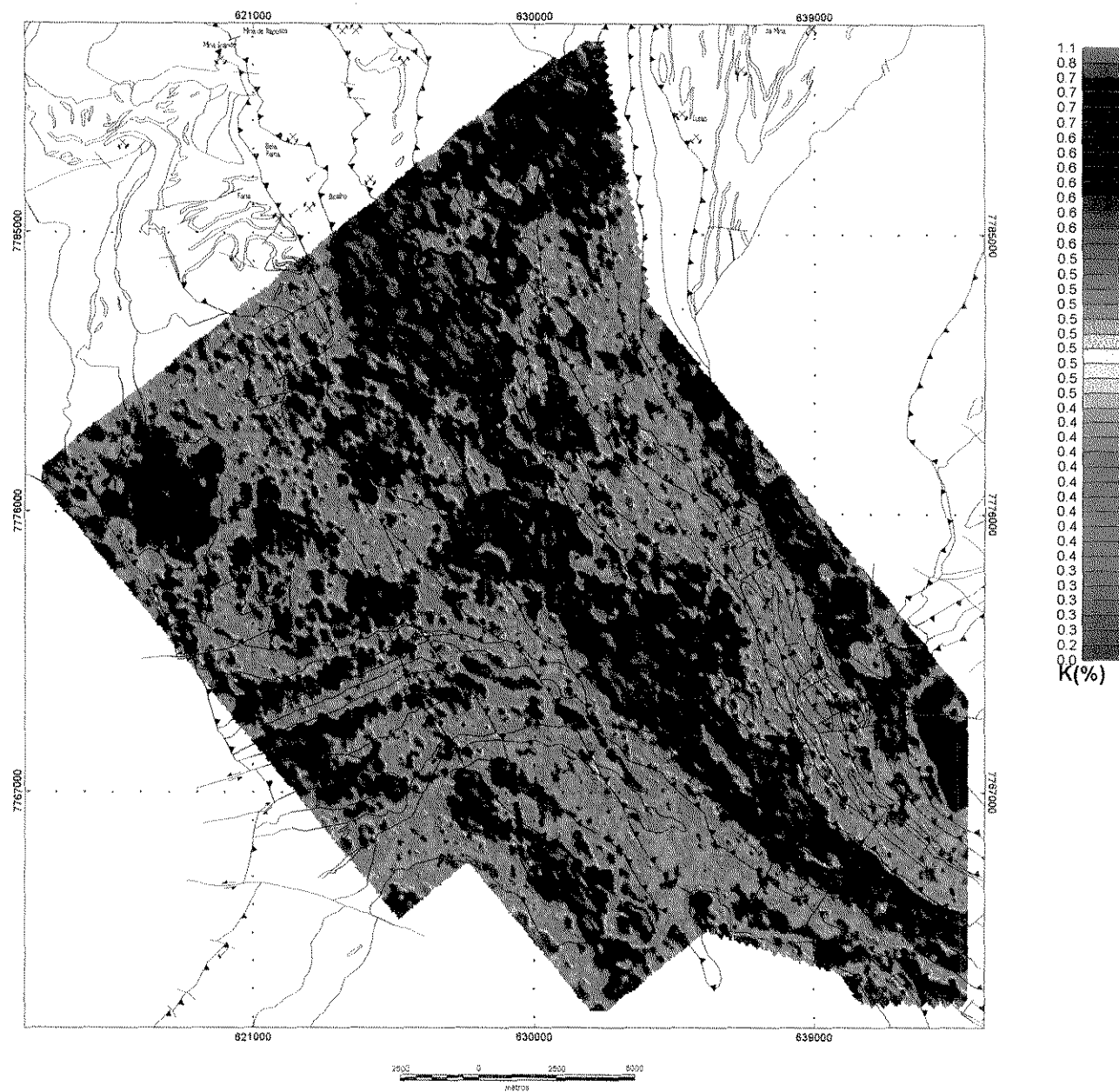


Figura 8.11 - Mapa de potássio micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

Essa região corresponde à parte das unidades Córrego do Sítio, Rio de Pedras e Mestre Caetano (Signorelli *et al.* 1993). No entanto, o comportamento do K nesta região sugere uma correspondência maior com a ZCSV, cujo eixo maior é representado pelo LSV. O lineamento é caracterizado por uma quebra de relevo radiométrico, representando uma diminuição para um teor médio de K de 0,40 %. Essa quebra ocorre ainda dentro dos limites da Unidade Córrego do Sítio (Signorelli *et al.* 1993). Nas porções E e SE da área teores semelhantes estão associados às unidades Mindá e Córrego do Sítio, respectivamente.

8.7.3 - MAPA DO TÓRIO

O Th é geralmente considerado um elemento imóvel, embora haja citações na literatura sobre sua depleção devido à presença de intemperismo (Smith 1975). Segundo Boyle (1982), o Th forma complexos orgânicos e inorgânicos que podem torná-lo relativamente solúvel e móvel sob certas condições naturais. No entanto, esses complexos são mais estáveis que aqueles formados pelo eU. Boyle (1982) ainda afirma que o Th pode ser móvel na forma de colóides. No caso de mineralizações auríferas associadas a zonas de alteração hidrotermal, o Th sofre depleção na rocha alterada em relação ao K. Esta relação, muito bem documentada por Ostrovskiy (1974), é denominada de antagonismo entre o K e o Th.

As Figuras 8.12 e 8.13 apresentam os mapas de eTh original e micronivelado, respectivamente. Semelhante aos mapas de CT e de K, o mapa de eTh (figura 8.13) apresenta valores extremamente baixos nas unidades máfica-ultramáficas (teores entre 2,5 e 4,0 ppm), destacando bem esses litotipos. A ZCSV é caracterizada por baixas concentrações desse elemento (teores entre 4 e 6 ppm), sugerindo uma associação direta entre sua depleção e os locais de maior alteração hidrotermal. Os valores mais altos são observados ao sul da área, nos domínios do CMB e na porção NE, na Unidade Córrego do Sítio, ambos com teores que variam de 8 a 13 ppm. As unidades mais clásticas do GM apresentam respostas variadas que não lhes permite caracterização.

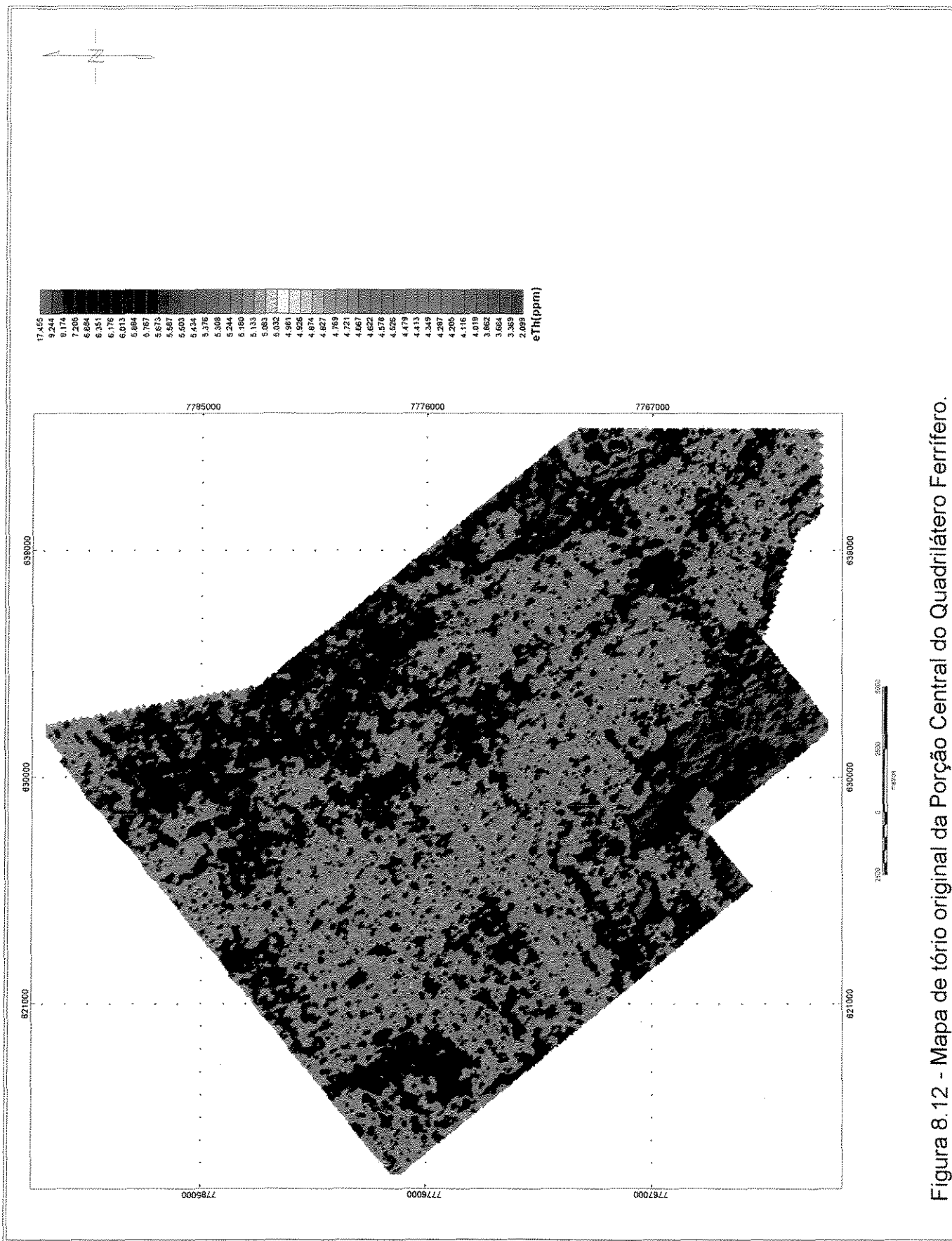


Figura 8.12 - Mapa de tório original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

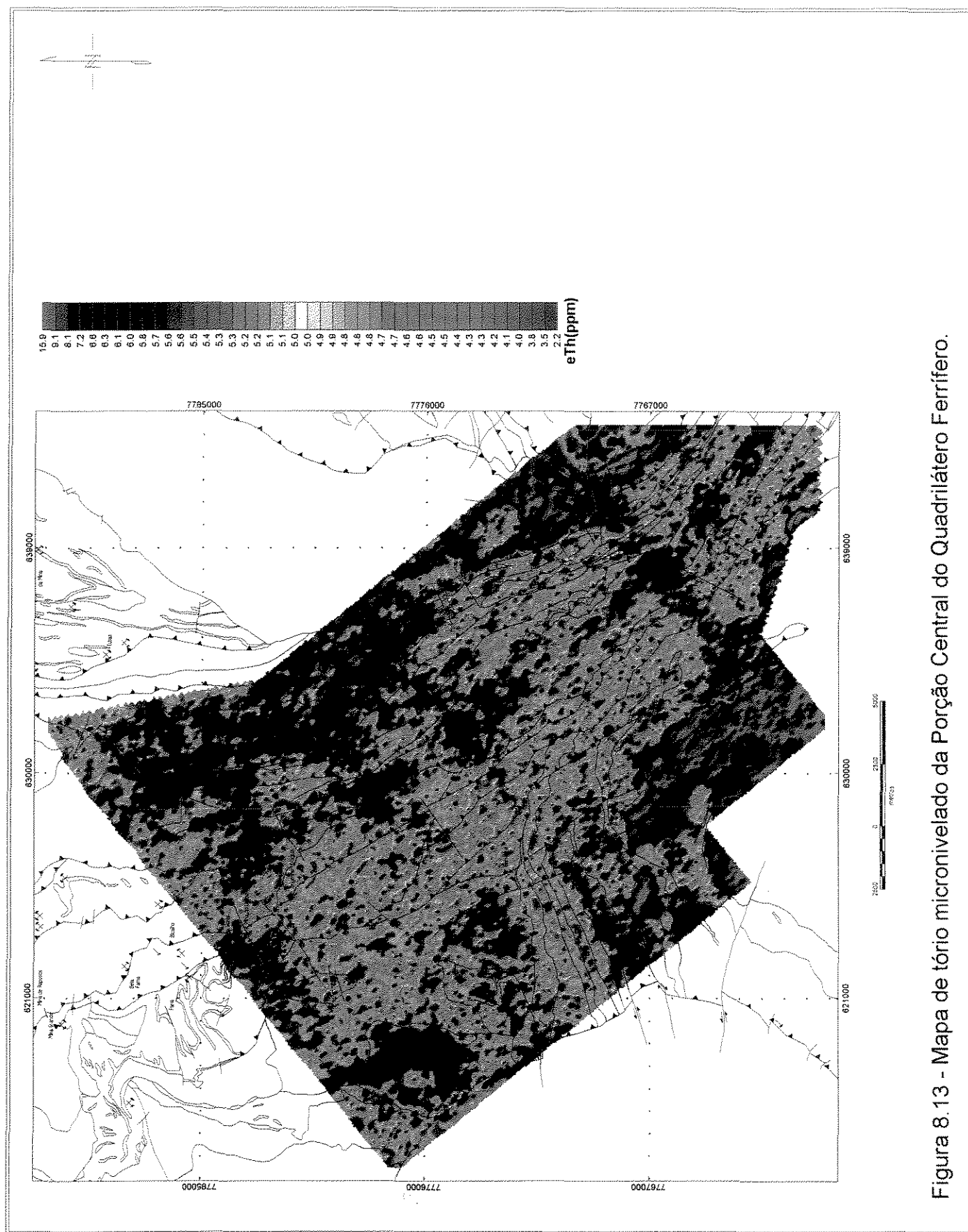


Figura 8.13 - Mapa de tório micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

8.7.4 - MAPA DO URÂNIO

O U é freqüentemente enriquecido em depósitos auríferos, embora seja amplamente móvel em ambientes oxidantes, a exemplo de zonas de alteração hidrotermal.

As Figuras 8.14 e 8.15 apresentam os mapas de eU original e micronivelado, respectivamente. Mesmo com o micronivelamento, são observados ruídos aleatórios remanescentes da fase de pré-processamento, cuja remoção pode levar à eliminação de informações significativas contidas nos dados. Mesmo assim, existe uma boa correspondência com os litotipos do CMB. De uma forma geral, o GNL apresenta valores extremamente baixos de eU nas suas unidades basais, seguidos por valores variados e indivisos nas unidades médias e superiores. O mesmo ocorre nas unidades clásticas do GM.

8.7.5 - MAPA DE RAZÕES

Dados gamaespectrométricos fornecem uma estimativa das concentrações superficiais de K, e de eTh e eU. Essas concentrações podem ser expressas pelos parâmetros radiométricos de K, eTh e eU e por razões derivadas entre dois ou três radioelementos.

Segundo Duval (1983), os mapas de razões tendem a realçar as diferenças litológicas devido à relação direta entre a concentração dos radioelementos e a composição mineral das rochas. Os efeitos causados pelas variações na umidade do solo, pela geometria da fonte e pelos erros associados às correções de altitude são eliminados em função da similaridade entre os coeficientes de atenuação dos materiais terrestres e atmosféricos dos três radioelementos (Duval *et al.* 1971).

Em zonas de alteração hidrotermal, geralmente, as anomalias de K vêm acompanhadas por concentrações variadas de U e muito baixas de Th (Gnojek & Prichystal 1985). Esses comportamentos, muitas vezes, são sutis e de difícil interpretação em mapas de parâmetros individualizados.

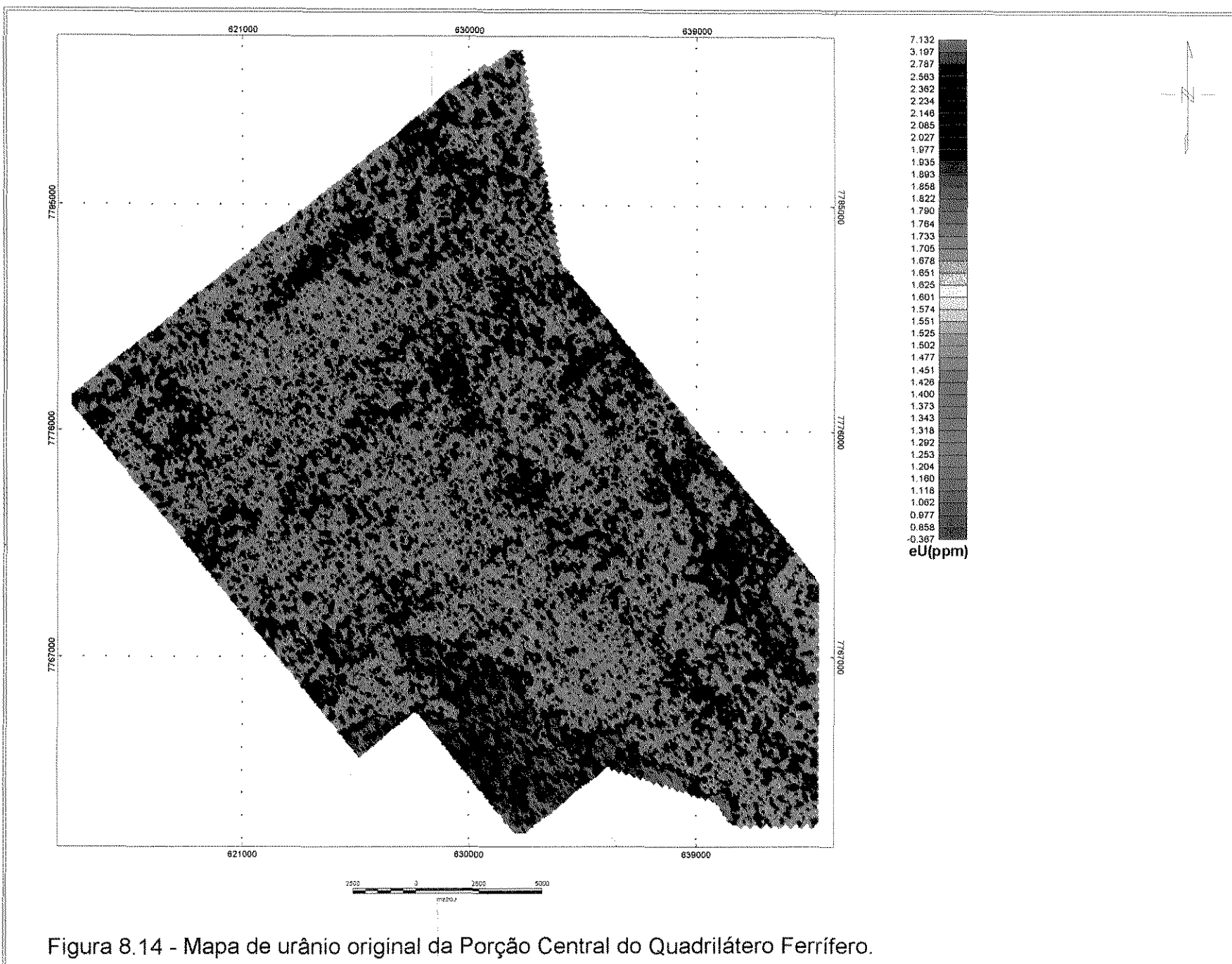


Figura 8.14 - Mapa de urânio original da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

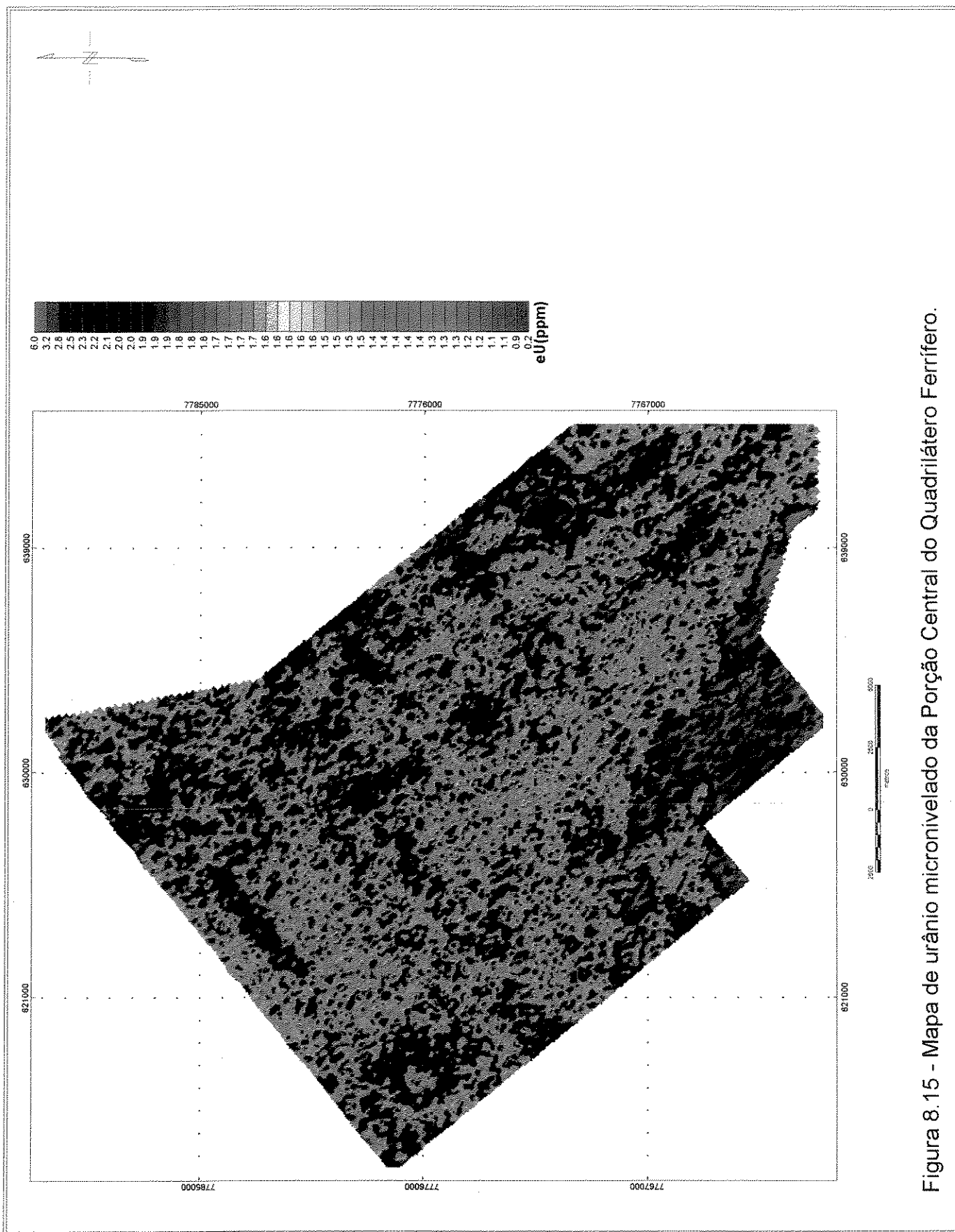


Figura 8.15 - Mapa de urânio micronivelado da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

Na tentativa de realçar e interpretar o comportamento relativo dos radioelementos e os possíveis contrastes entre suas concentrações, são calculadas diferentes combinações entre os parâmetros de K, eTh e eU. Os resultados são apresentados na forma de quatro mapas coloridos.

8.7.5.1 - MAPA DA RAZÃO TÓRIO/POTÁSSIO

A Figura 8.16 apresenta o mapa de razão entre eTh/K onde importantes informações a respeito do comportamento contrastante entre esses dois elementos podem ser avaliadas. Na porção central da área observa-se uma concentração de valores extremamente baixos de eTh, típica de processos de alteração que acompanham um enriquecimento relativo de K. Essa faixa encontra-se bem delimitada e corresponde à ZCSV, região com intensos processos de alteração hidrotermal descritos nos trabalhos de CPRM (1993) e Signorelli *et al.* (1993). Segundo os mesmos autores, essa zona de alteração ocorre nas unidades do GNL (Unidade Córrego do Sítio) e GM (Unidade Rio de Pedras). No entanto, à semelhança do mapa do K, a razão eTh/K não possui uma boa correspondência com a identificação dessas unidades e sim com uma mudança brusca de comportamento da relação entre os dois elementos que representa o final dos processos de alteração associados à maior concentração de K. Além do comportamento homogeneamente antagônico entre eTh e K ao longo da ZCSV, a razão eTh/K registra de forma bem clara o LSV. Esses indicativos sugerem uma reavaliação detalhada do mapeamento das unidades Córrego do Sítio e Rio de Pedras, adicionando-se o fato de que a intensa alteração hidrotermal nessas unidades registrada nas avaliações de campo do presente trabalho restringe a cartografia das mesmas, tanto *in situ*, quanto através de sistemas remotos. A Unidade Mindá está associada a baixas razões eTh/K, mostrando a mesma relação de antagonismo entre os elementos.

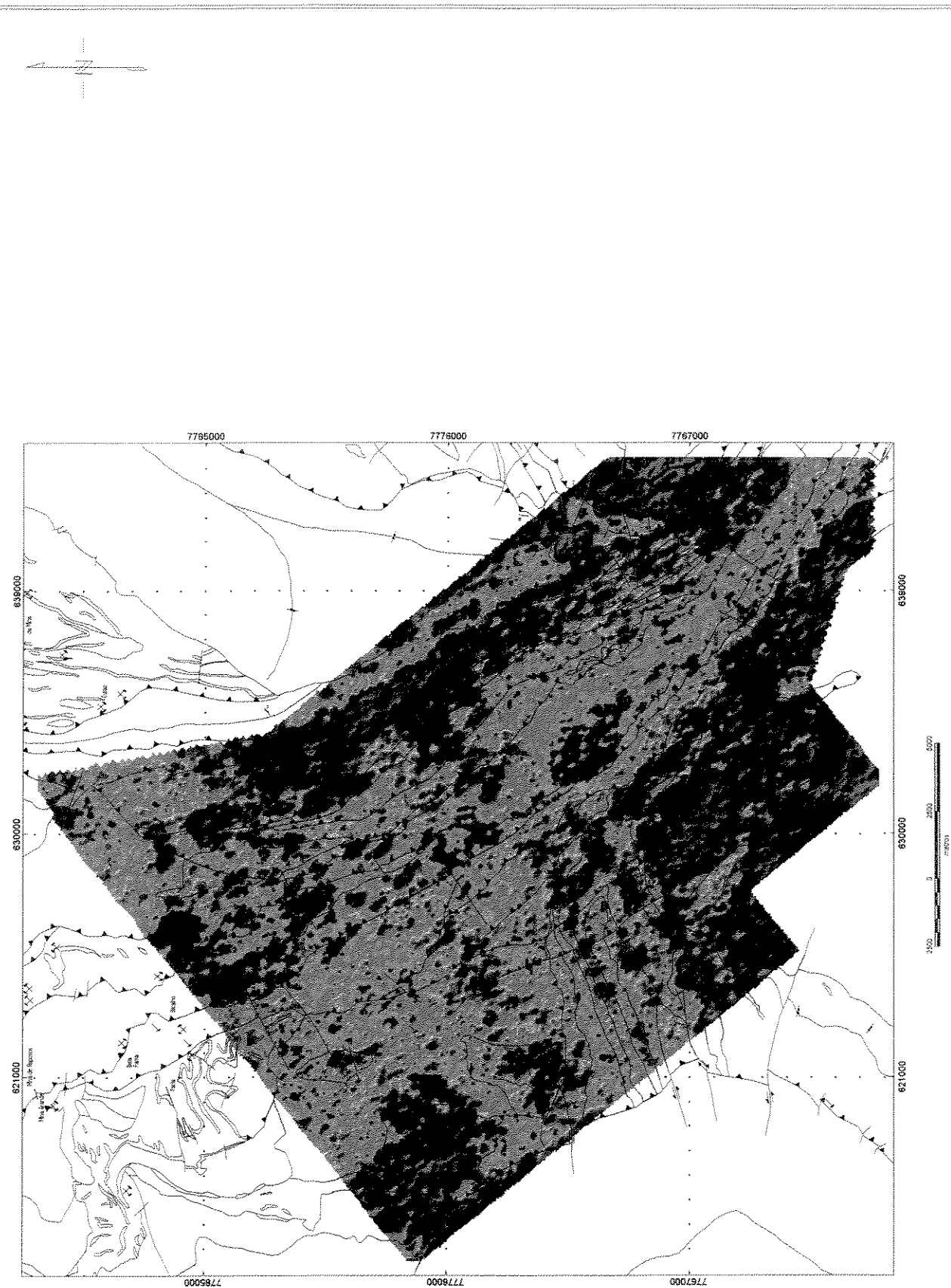


Figura 8.16 - Mapa da razão eTh/K da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

8.7.5.2 - MAPAS DAS RAZÕES URÂNIO/ POTÁSSIO e URÂNIO/ TÓRIO

Os mapas gerados pelas razões eU/K e eU/eTh não apresentam resultados satisfatórios devido à presença dos ruídos aleatórios remanescentes nos dados micronivelados de eU .

Esses ruídos são, ainda mais, realçados nas razões e restringem as interpretações. As Figuras 8.17 e 8.18 mostram os mapas correspondentes às razões eU/K e eU/eTh , respectivamente.

8.7.6 - MAPA DO PARÂMETRO F

Os mapas de K e da razão eTh/K detectaram concentrações de K associadas, em muitos locais, à presença de processos de alteração hidrotermal nas unidades geológicas. No que se refere ao GNL, o K chega a concentrações de 1,04 %, acompanhado por concentrações baixas de eTh (4 a 6 ppm) e concentrações médias de eU (1 a 2,5 ppm). O comportamento antagônico entre eTh e K é descrito por Ostrovsky (1973) e testado por Efimov (1985) em regiões mineralizadas associadas a processos de alteração com enriquecimento secundário de K , através de razões derivadas de K , eU e eTh . A razão mais efetiva, denominada Parâmetro F ($K.(eTh/eU)$), é testada no presente trabalho com subsídio à avaliação do comportamento do K em relação à razão eTh/eU .

A Figura 8.19 apresenta o mapa do Parâmetro F , onde se observa que a relação derivada dos três radioelementos não acrescentou informações aos resultados obtidos nos mapas de CT , K e eTh/K .

|
|
|
|
|
|
|
|
|

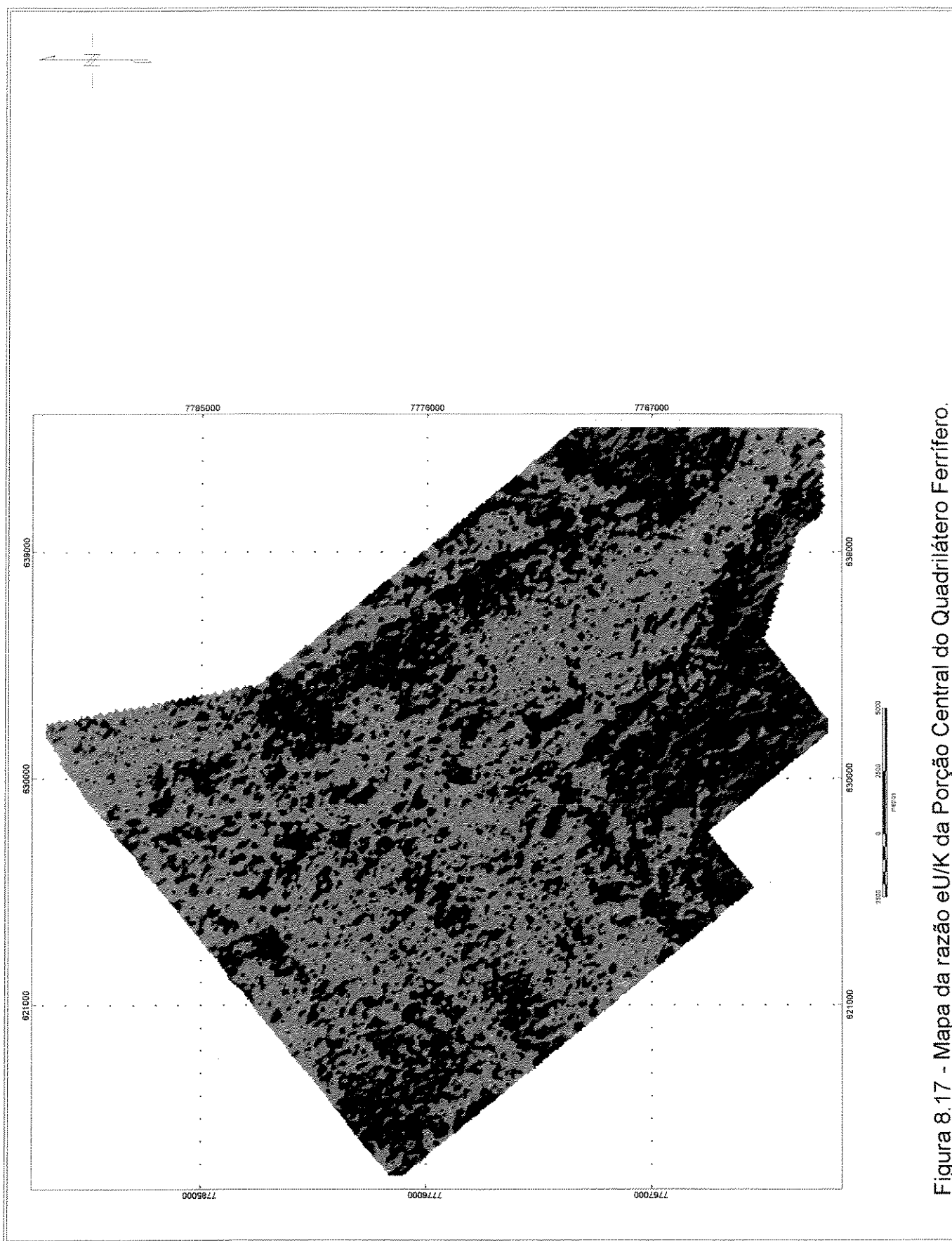


Figura 8.17 - Mapa da razão eU/K da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

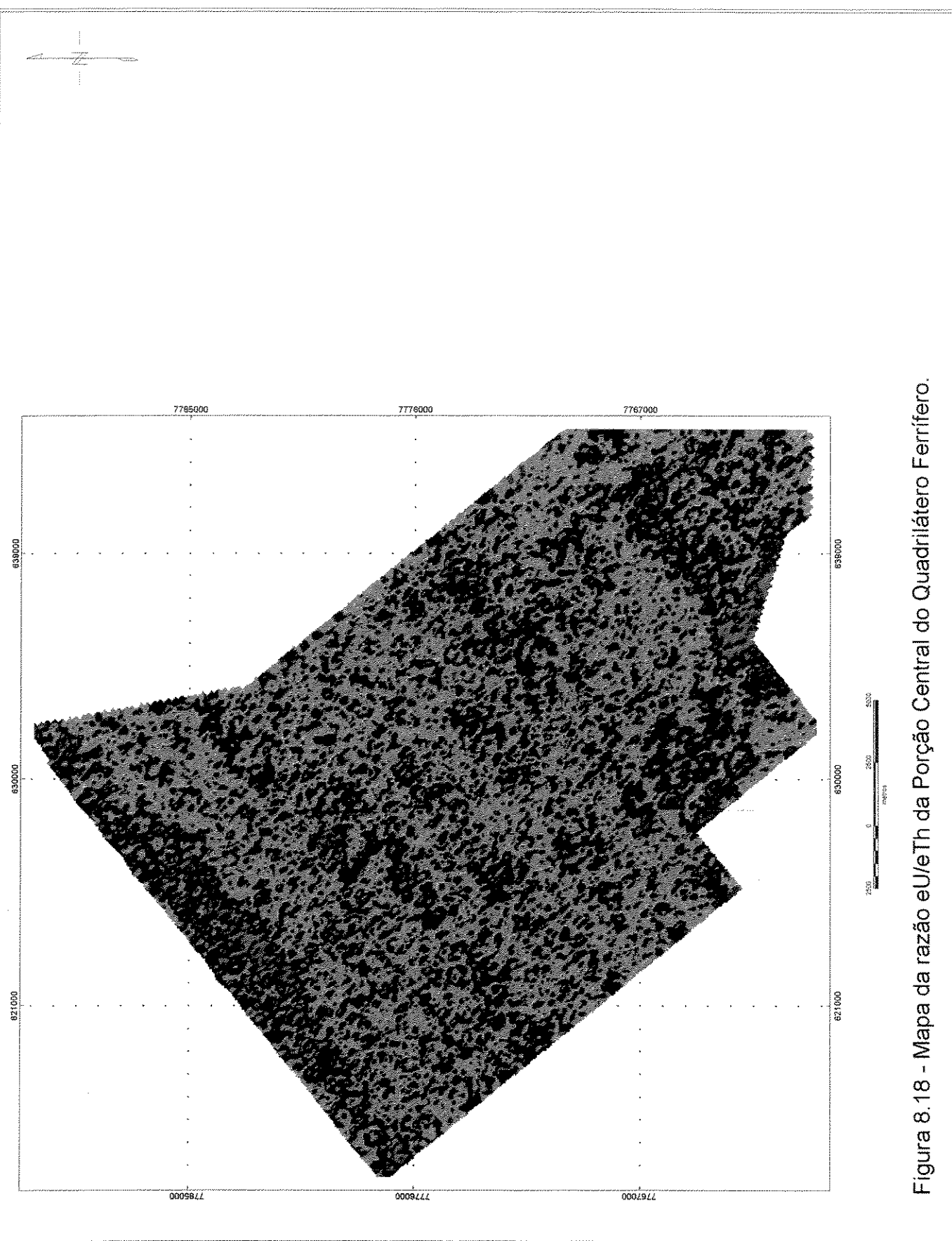


Figura 8.18 - Mapa da razão eU/eTh da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

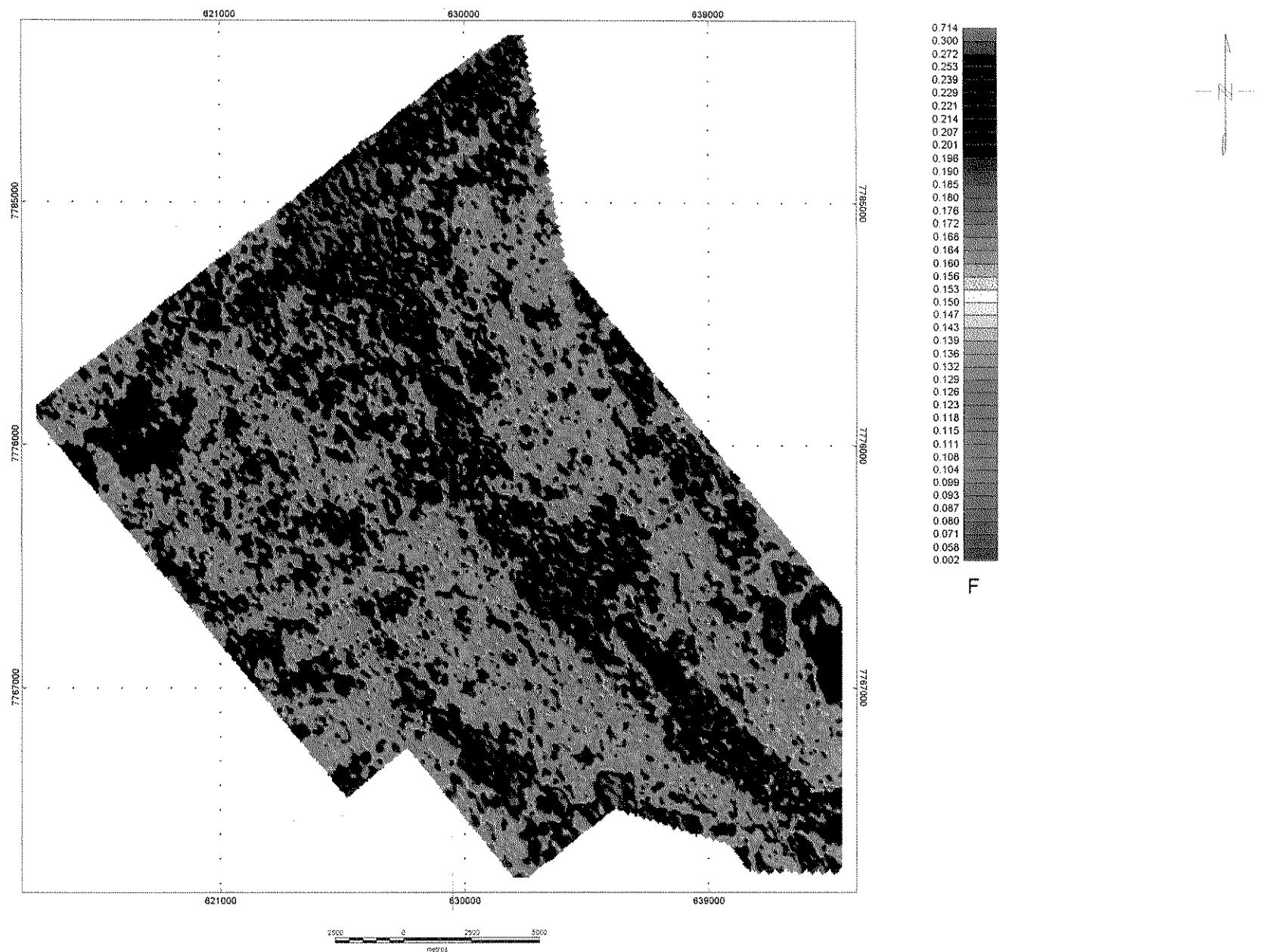


Figura 8.19 - Mapa do Parâmetro F (K.[eTh/eU]) da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero.

Discussão:

As respostas radiométricas obtidas na pesquisa e exploração de depósitos minerais são variadas (Dickinson & Scott 1997), embora uma tentativa de sistematização dessas e de outras assinaturas geofísicas tenha sido realizada por Hoover *et al.* (1992). Na exploração de depósitos de ouro do tipo *lode* em *greenstone belts* existe uma excelente correlação entre o controle estrutural, a rocha hospedeira, a mineralização, o grau metamórfico e a alteração associada. Destes, a alteração hidrotermal, associada ao enriquecimento relativo de K, é de relevada importância, uma vez que pode ser mapeada a partir da avaliação do comportamento dos três radioelementos.

Neste aspecto, o K é considerado o elemento rastreador da mineralização, geralmente caracterizado pela presença de halos na zona de alteração hidrotermal, mesmo na presença de veios de quartzo (Dickinson & Scott 1997). O Th, freqüentemente, é depletado nessas condições e o U revela um comportamento variado. É importante mencionar que a alteração hidrotermal é um processo que causa modificações substanciais no conteúdo de radioelementos da rocha encaixante, principalmente do K, podendo acarretar erros de mapeamento litológico. Nesse caso, um detalhamento de campo (mapeamento geológico-estrutural e análise geoquímica) deve ser efetuado de forma complementar.

8.8 - DADOS ELETROMAGNÉTICOS

8.8.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos processamentos dos dados de HEM, cuja configuração do sistema foi originalmente concebida para a exploração mineral dos terrenos canadenses (Palacky & West 1992). O sistema AERODAT possui um modelo com quatro pares de bobinas que operam de forma independente e em frequências separadas, geralmente, com arranjos vertical coaxial (930 e 4600 Hz) e horizontal coplanar (4300 e 33000 Hz) em relação à direção do voo. A configuração multi-frequência é recomendada nos levantamentos de alta resolução, onde a ênfase é dada na definição de zonas condutoras em profundidades variáveis. A adoção de diferentes arranjos de bobinas permite discriminar e realçar feições geoelétricas localizadas, tais como fraturas ou veios condutivos. O levantamento HEM do PRV utilizou, efetivamente, um arranjo nas frequências 930 Hz (bobinas verticais coaxiais) e 4175 Hz e 33000 Hz (bobinas horizontais coplanares).

Para facilitar o mapeamento de anomalias prospectivas foram gerados mapas de resistividades aparentes correspondentes às três frequências (930, 4600 e 33000 Hz) (CPRM 1993). As resistividades aparentes foram calculadas através do modelo do semi-espaco condutivo (Fraser 1978 e 1979) no qual o substrato terrestre é considerado uniforme (condutividade constante). A partir dos registros em fase e quadratura foram estimados os valores de resistividade aparente e os resultados expressos numa escala logarítmica conforme consta na Tabela 4.2 (CPRM 1993).

As Figuras 8.20, 8.21 e 8.22 mostram os mapas de resistividade aparente nas frequências de 935, 4175 e 33000 Hz, respectivamente.

I

I

I

I

I

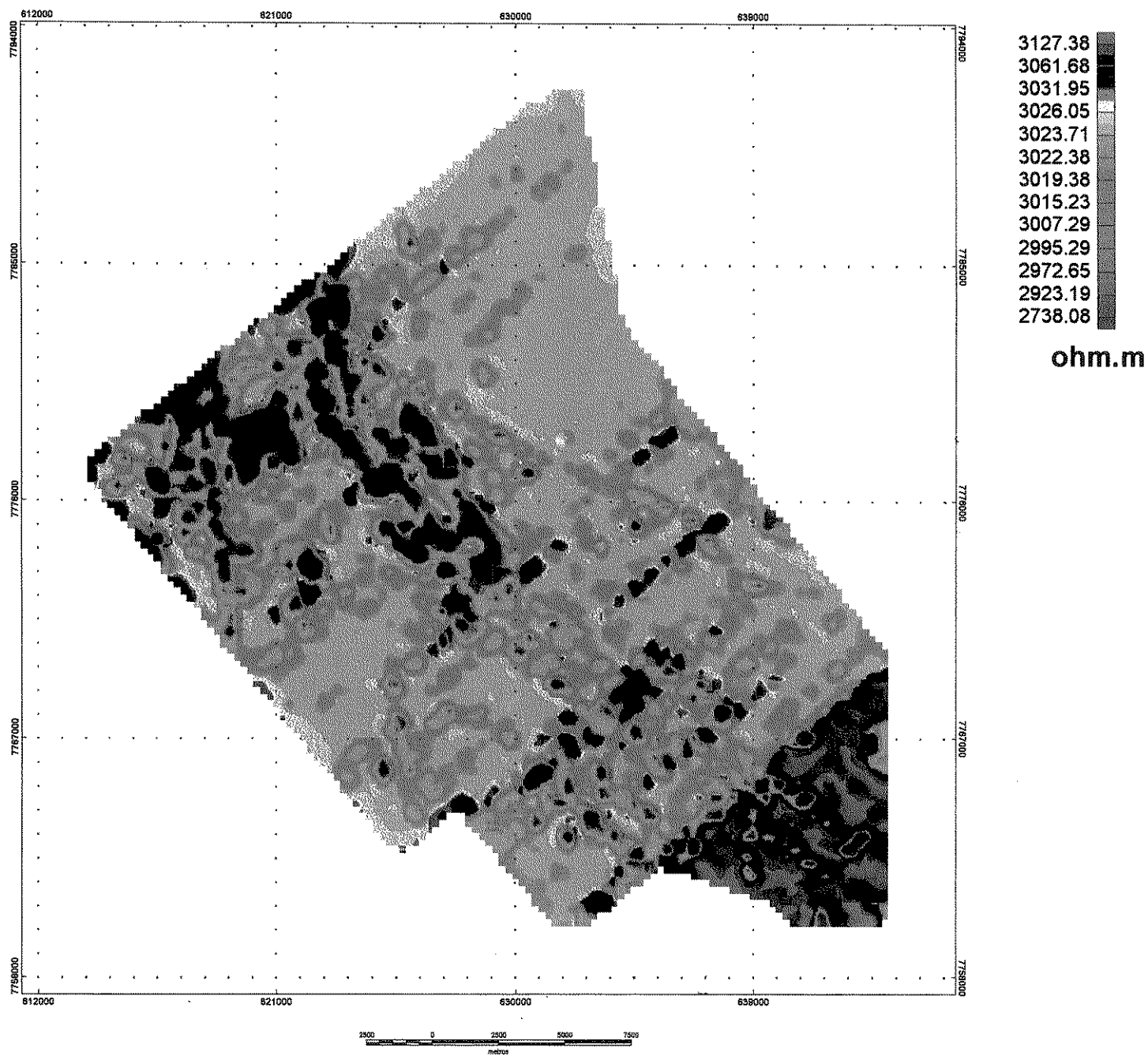
I

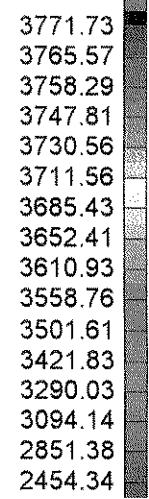
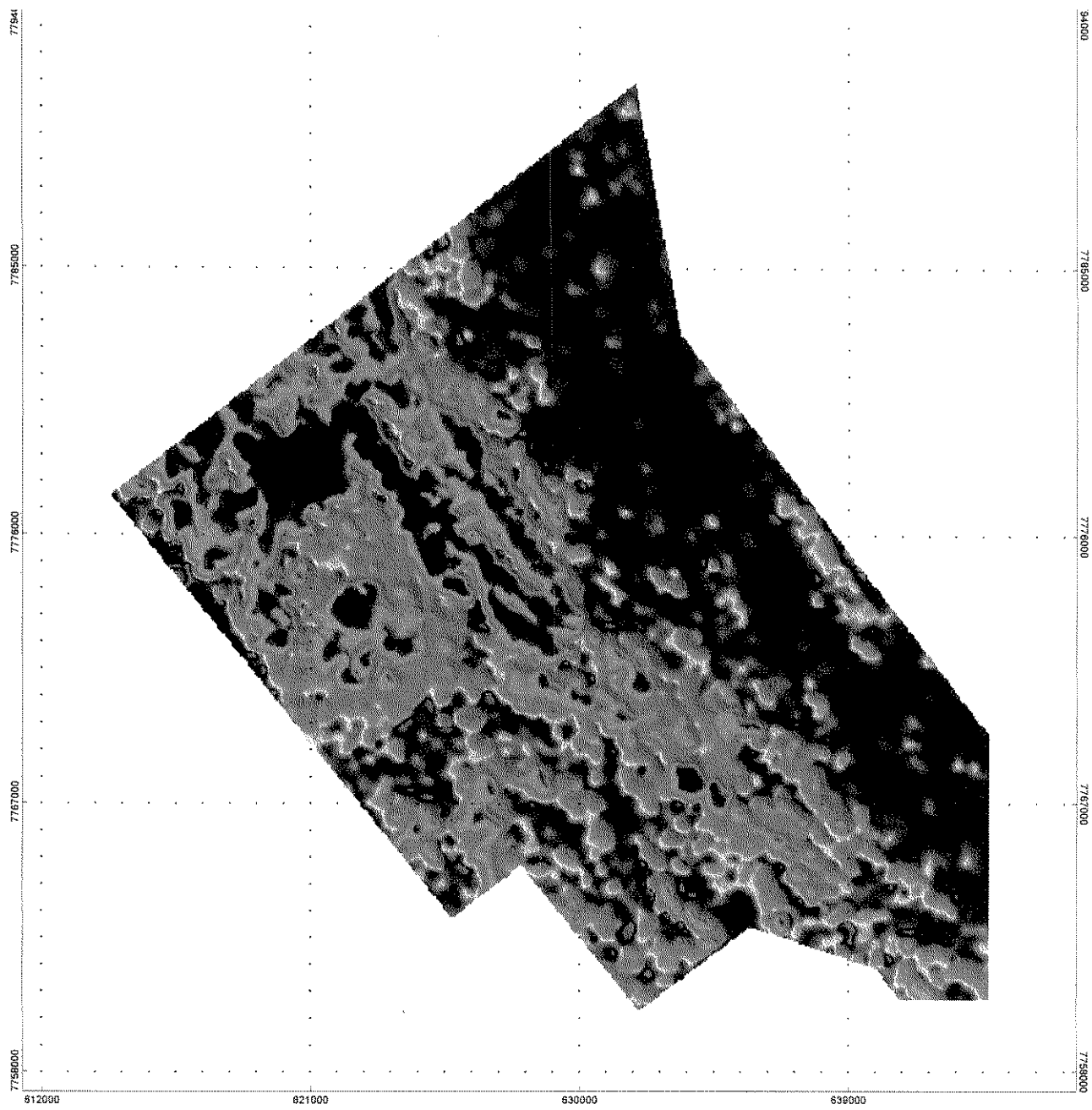
I

I

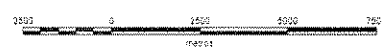
I

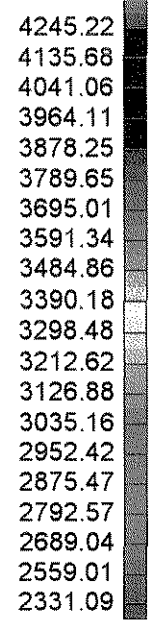
I



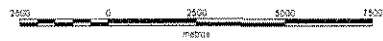
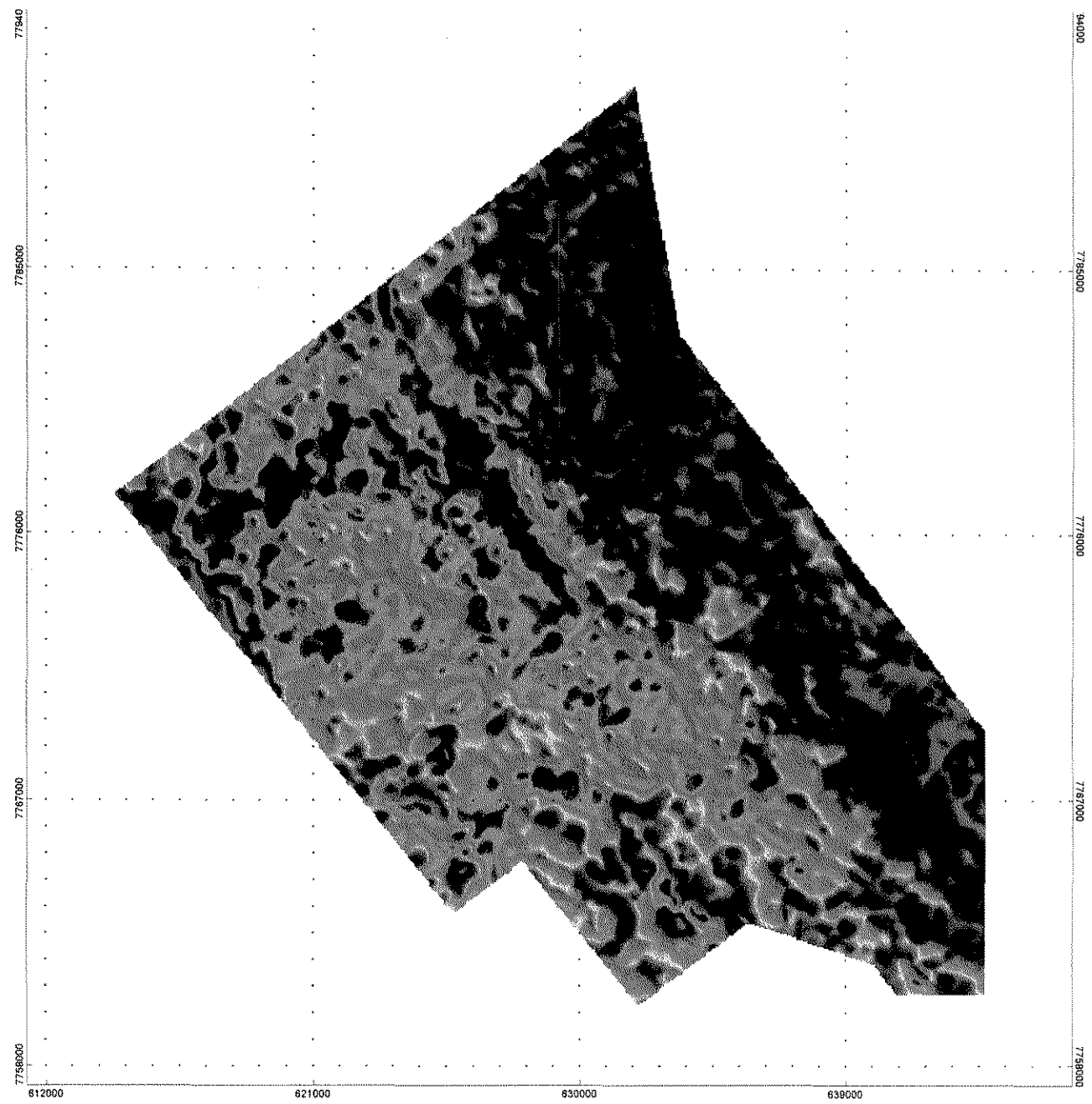


ohm.m





ohm.m



8.8.2 - RESPOSTAS ESPERADAS PARA AS UNIDADES CONDUTORAS DA ÁREA DE ESTUDO

A anomalia eletromagnética causada por um condutor isolado, no interior de um meio resistivo pode ser representada em perfis correspondentes diversos. A Figura 8.23 mostra perfis esperados em um levantamento HEM semelhante ao do PRV, com diversas formas de condutores: placas horizontal e vertical (simétricas ao longo da linha de voo) e esfera, nas situações de arranjo de bobinas horizontal coplanar e vertical coaxial. Para cada modelo são apresentados perfis em fase e quadratura nas frequências 20, 2 e 0,4 kHz. Observa-se que placas condutoras horizontais produzem um pico central no caso de bobinas horizontais coplanares, cuja amplitude é tanto maior quanto maior a frequência utilizada. No arranjo de bobinas vertical coaxial percebe-se que a placa horizontal produz respostas mais fracas e perfis mais complexos com picos duplos. Já os condutores esféricos produzem picos centrais nos dois tipos de arranjos. De uma forma geral, nota-se que o arranjo horizontal coplanar é mais sensível em situações de placas condutoras horizontais, definindo melhor os picos das anomalias em fase e quadratura. Para o caso de placas condutoras verticais, o melhor desempenho ocorre no arranjo vertical coaxial.

A Figura 8.24 apresenta situações de placas condutoras mergulhantes que produzem perfis com anomalias assimétricas de picos duplos nos dois arranjos de bobinas. Observa-se que para ambos os arranjos o aumento da assimetria é inversamente proporcional ao aumento da inclinação da placa.

A geometria da anomalia de corpos condutores depende, não somente, da forma e orientação do condutor, como de sua dimensão, especialmente no caso de uma placa condutora horizontal. A Figura 8.25 apresenta três situações para placas com extensão lateral de 50, 100 e 250 m nos arranjos horizontal coplanar e vertical coaxial. O arranjo horizontal coplanar mostra anomalias de pico simples, tanto maiores em amplitude e extensão, quanto maior a espessura da placa condutora.

No arranjo vertical coaxial essa relação também é direta, mas os perfis são mais complicados, produzindo respostas relativamente mais fracas e picos duplos com fortes efeitos de borda.

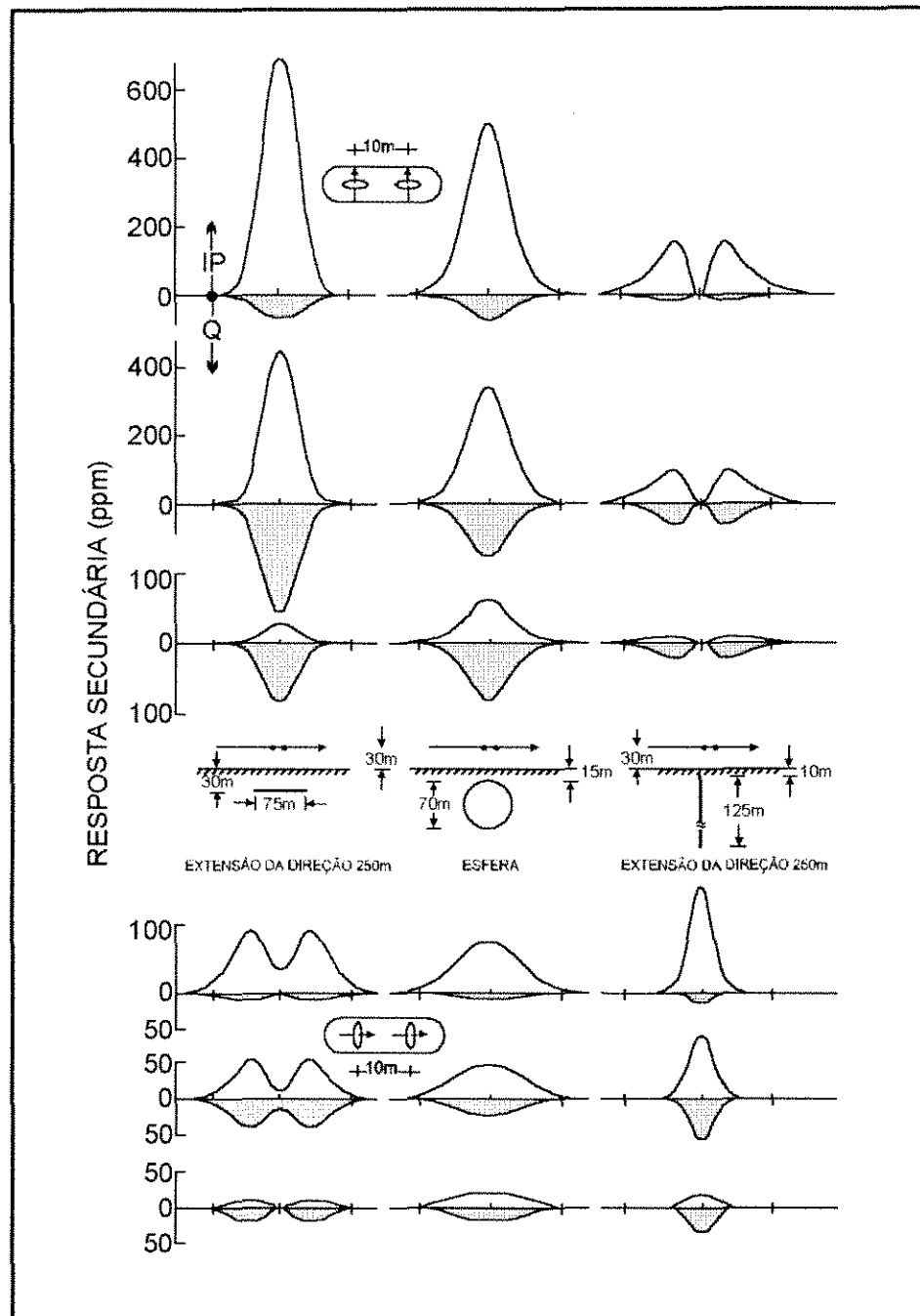


Figura 8.23 – Perfis de levantamento HEM sobre condutores isolados de diferentes formas: placa horizontal, esfera e placa vertical. Para cada modelo, perfis de anomalias em fase (IP) e quadratura (Q) são apresentados para três frequências: 20 kHz (topo), 2 kHz e 0,4 kHz. Todas as transversais são sobre o centro dos condutores e normais à direção. Os condutores referentes às placas possuem uma condutância de 10 S e a esfera tem uma condutividade de 2,5 S/m. Fonte: Palacky & West (1992).

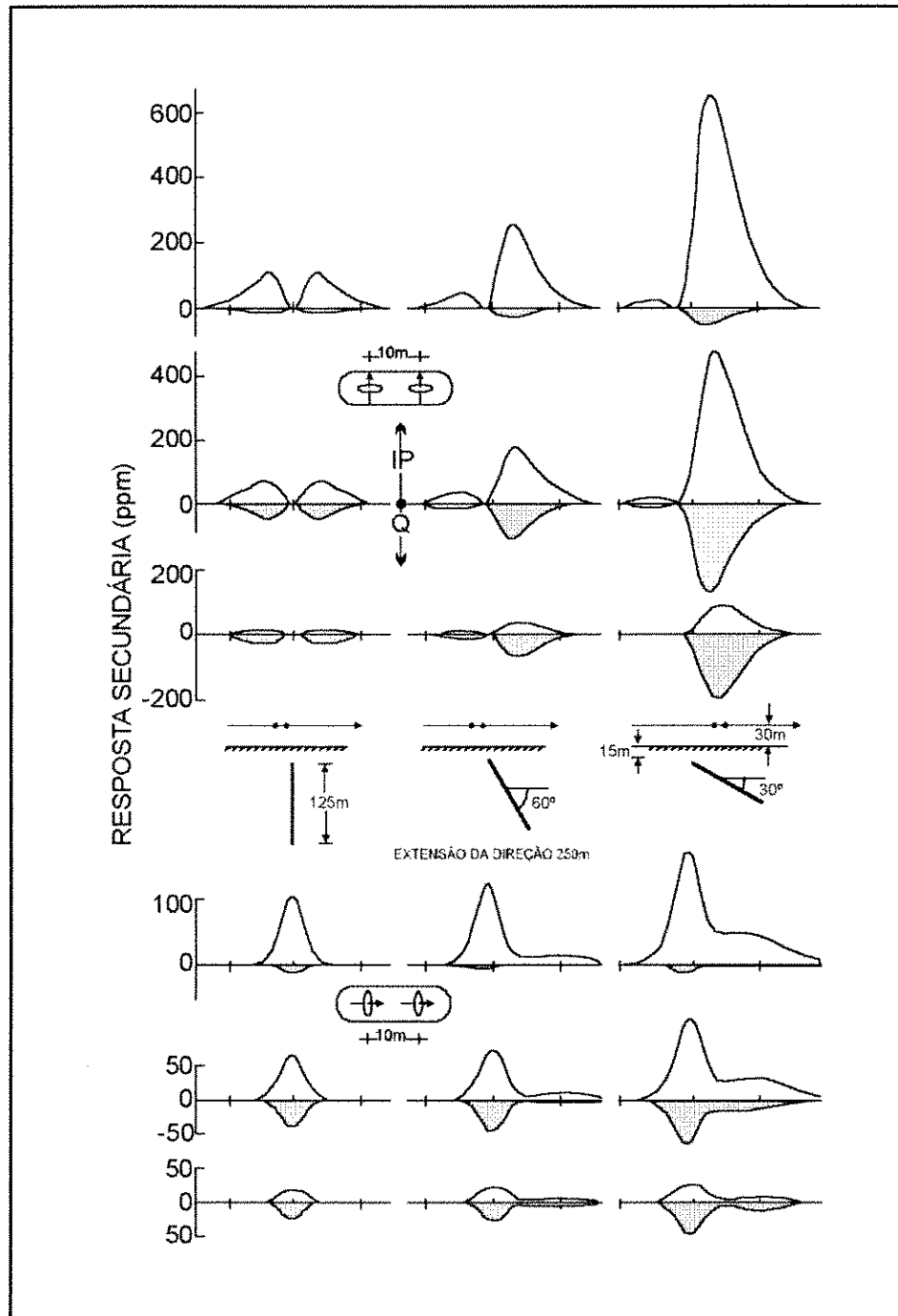


Figura 8.24 – Anomalias HEM teóricas em fase (IP) e em quadratura (Q) para frequências de 20 (topo), 2 e 0,4 kHz e modelos de placas condutoras com diferentes mergulhos. Arranjos adotados: horizontal coplanar (parte superior da figura) e coaxial (parte inferior). Respostas relativamente mais fracas são obtidas no modelo de placa vertical mesmo considerando o arranjo coaxial. Fonte: Palacky & West (1992).

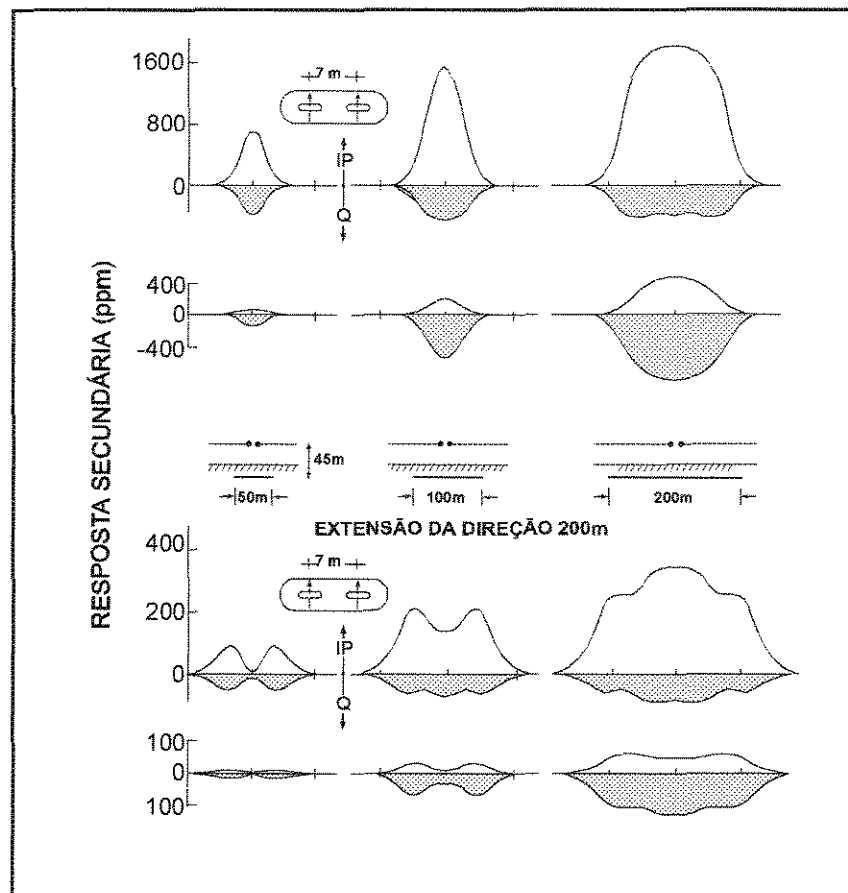


Figura 8.25 - Anomalias HEM teóricas em fase (IP) e em quadratura (Q) para modelos de lâminas com condutividade de 2 S e diferentes comprimentos para frequências de 0,4, 2 e 20 kHz (da esquerda para a direita). O arranjo vertical coplanar (parte inferior da figura) mostra anomalias de menor amplitude e com maior distorções nas bordas que as correspondentes ao arranjo vertical coplanar (parte superior). Fonte: Palacky & West (1992).

De uma forma geral, as mudanças na frequência afetam muito mais a fase e a amplitude da resposta quando comparadas às variações na geometria do condutor. As mudanças na profundidade e na dimensão desse, somadas ao seu posicionamento em relação às linhas de vôo, podem causar um forte efeito na resposta da amplitude, mas somente um menor efeito nas suas fase e geometria. (Palacky & West 1992).

No PRV os seguintes arranjos foram utilizados na aquisição dos dados:

- Arranjo horizontal coplanar com frequências de 4175 Hz e 33000 Hz: o arranjo horizontal coplanar permite investigações em maior profundidade e é mais sensível à presença de condutores horizontais. Por outro lado, as frequências utilizadas têm um menor grau de penetração, mas definem melhor os condutores horizontais, principalmente na maior frequência;
- Arranjo vertical coaxial com frequência de 935 Hz: o arranjo entre as bobinas permite um menor grau de penetração e é mais sensível à presença de condutores verticais. Por outro lado, esta frequência permite investigações em maior profundidade e define melhor os condutores verticais, apesar ser mais susceptível à geração de ruídos durante a fase de aquisição dos dados.

Na presença de condutores inclinados ambos os arranjos apresentam respostas mais complexas que dificultam a interpretação devido à formação de picos duplos assimétricos.

8.8.3 - EFEITOS DO MANTO DE ALTERAÇÃO NOS LEVANTAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS

O intenso grau de alteração, típico de clima tropical, que domina as unidades da região estudada afeta consideravelmente as respostas de sistemas eletromagnéticos. Palacky & Kadekaru (1978) testam esta influência em unidades do GNL presentes na Folha Rio Acima, cujos mantos de alteração variam de 20 m a 90 m. Os mesmos autores classificaram as camadas de alteração em níveis A (zona de eluviação^{8.1}) e B (zona de iluviação^{8.2}), sendo a primeira (zona superior) a mais resistiva. Foram registradas medidas terrestres sobre duas unidades do GNL:

^{8.1} Movimento descendente de soluções variadas, ou suspensões coloidais, num solo.

^{8.2} Concentração de argilas, sesquióxidos, carbonatos, etc., em uma certa camada do solo.

- Clorita-xistos: camada superior A com espessura média de 10 m e resistividade de 4000 $\Omega.m$. Camada inferior B com espessura média de 35 m e resistividade de 80 $\Omega.m$;
- Rochas de composição granodiorítica: camada superior A com espessura média de 5 m e resistividade de 2000 $\Omega.m$. Camada inferior B com espessura média de 25 m e resistividade de 220 $\Omega.m$.

Vale a pena mencionar que, segundo informações verbais do Geofísico Augustinho Rigoti, estas estimativas são muito otimistas e, freqüentemente, deve-se ter resistividades menores que essas, principalmente em espessas camadas alteradas saturadas.

Furos de sondagem realizados pela Empresa Mineração Morro Velho (dados não publicados) na Urubu e adjacências registram a presença de solo em profundidades de até 50 m, passando para um carbonato-sericita-quartzo xisto bastante alterado que atinge 100 m. Dorr (1969) constatou um espesso manto de alteração de “50 m ou mais” em todo o Quadrilátero Ferrífero, o que também foi observado durante as fases de campo realizadas pela presente autora na área investigada. Essa situação cria uma dificuldade na investigação das formações subjacentes ao manto alterado e torna necessário estimar a profundidade de investigação propiciada pela configuração do sistema HEM.

8.8.4 - ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO

A estimativa da profundidade de investigação pode ser obtida utilizando o gráfico da Figura 8.26 (Mundry 1984) que contém respostas teóricas para um sistema horizontal coplanar com separação de bobinas de 10 m situado sobre um modelo de duas camadas. Este modelo é constituído por uma camada com espessura (t) e condutividade (σ) sobreposta a um semi-espaco condutivo. A profundidade de investigação para um modelo de duas camadas pode ser estabelecida como sendo o valor no qual a resposta do sistema HEM ainda percebe a existência de duas camadas e não apenas um semi-espaco homogêneo com a condutividade da camada superior. A

distinção entre os dois modelos é possível nas situações em que as curvas teóricas correspondentes aos dois modelos são diferentes dentro de uma margem aceitável para os erros de medida.

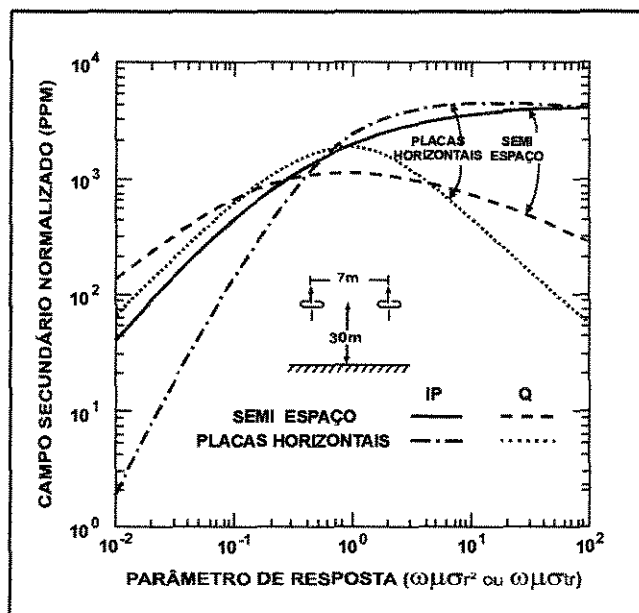


Figura 8.26 – Respostas de um sistema HEM para uma camada sobreposta a um semi-espaco condutivo. As respostas no semi-espaco sofrem uma transição mais lenta do limite resistivo para o limite indutivo quando comparadas com as respostas da placa horizontal. As curvas estão representadas para um sistema coplanar horizontal com 7 m de separação entre bobinas e dependem somente do parâmetro adimensional de resposta. Fonte: modificado de Mundry (1984).

Com base na Figura 8.26 e num processo de interpretação quantitativa, os dados medidos pelo sistema HEM (expressos em ppm) seriam anotados no eixo das ordenadas permitindo a obtenção do parâmetro de resposta (R), dado pela equação:

$$R = \omega \mu \sigma r \quad (8.1)$$

sendo,

- R = parâmetro de resposta
- ω = frequência angular ($2\pi f$)
- μ = permeabilidade magnética ($4\pi 10^{-7}$ H/m)
- σ = condutividade elétrica da camada superior
- t = espessura da camada
- r = distância entre bobinas

Uma vez definido R , determinam-se os parâmetros desconhecidos (a espessura ou a condutividade elétrica), já que os demais (frequência, permeabilidade magnética e distância entre as bobinas) são conhecidos. A estimativa da profundidade de investigação a partir do gráfico da Figura 8.26 requer um raciocínio um pouco diferente. Como mostra essa figura, valores de R menores que 10^{-1} fornecem curvas teóricas similares para os dois modelos, principalmente no componente em fase, tornando-os indistinguíveis com base nesses dados. Conforme discutido por Palacky & West (1992), a distinção é possível a partir da curva do componente em fase que, no entanto, assume valores muito baixos. Na prática, tal situação compromete os resultados devido à degradação por ruídos. Assumindo um valor mínimo de $R=10^{-1}$, onde os dois modelos são discriminados e considerando condutividades (resistividades) compatíveis com os valores encontrados na região estudada ($80 \Omega.m$), além de outros dois estimados (40 e $20 \Omega.m$), foi construída a Tabela 8.1 que assinala os valores de t (espessura da primeira camada), calculados pela equação 8.1, em diferentes situações. Valores menores de R associam-se a profundidades maiores, mas segundo a análise efetuada, não permitem a distinção dos modelos considerados, já que suas curvas teóricas são praticamente coincidentes.

Tabela 8.2 – Valores de espessura da camada (t) calculados pela equação 8.1, expresso em metros, correspondentes ao valor de $R=10^{-1}$, nas frequências de 935, 4175 e 33000 Hz e nas resistividades (camada superior) de 20, 40 e $80 \Omega.m$.

| f (Hz) | $\rho = 20 \Omega.m$ | $\rho = 40 \Omega.m$ | $\rho = 80 \Omega.m$ |
|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 935 | $t = 38,70 \text{ m}$ | $t = 77,41 \text{ m}$ | $t = 154,81 \text{ m}$ |
| 4175 | $t = 8,70 \text{ m}$ | $t = 17,33 \text{ m}$ | $t = 34,67 \text{ m}$ |
| 33000 | $t = 1,10 \text{ m}$ | $t = 2,10 \text{ m}$ | $t = 4,39 \text{ m}$ |

Evidentemente, as profundidades calculadas na Tabela 8.1 devem ser consideradas como referência geral para um estudo em bases qualitativas e constituem estimativas mais consistentes que aquelas obtidas por aproximações e que não levam

em consideração a natureza dipolar dos campos EM empregados nos levantamentos aerotransportados.

Nota-se que a espessura máxima de camada estimada (154,81 m) ocorre na frequência 935 Hz, em materiais geológicos com $\rho = 80 \Omega.m$ e, em tese, inalterados. Valores por volta de 50 m, às vezes, chegando a 100 m, assinalam profundidades compatíveis com o nível regolítico. Apesar de Palacky e Kadokaru (1978) das estimativas para a resistividade dos xistos do GNL em profundidades não superiores a 50 m, é prudente considerar a possibilidade de valores inferiores a $80 \Omega.m$, levando em conta a condição de coberturas saturadas, comum neste ambiente.

8.8.5 – INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DOS DADOS HEM DO PRV

Avaliando-se os arquivos xyz dos dados originais observa-se que as amplitudes dos campos HEM do PRV são da ordem de 20 ppm para frequências mais altas. Esses valores são muito inferiores ao esperado teoricamente conforme mostra a figura 8.23 ou gráficos similares existentes na literatura (Palacky & West 1992). No arranjo horizontal coplanar espera-se, por exemplo, valores na ordem de uma centena de ppm e, nas frequências maiores, de até 600 ppm (observar figuras 8.23, 8.24 e 8.25). A razão dos valores muito abaixo do esperado não pode ser explicada com base na documentação existente a respeito do PRV. Apesar disto, constitui uma questão relevante que deve ser esclarecida, caso iniciativas de interpretação quantitativa sejam tomadas.

8.8.5.1 – GERAÇÃO DE MAPAS DE CONDUTIVIDADE

A geração dos mapas finais foi feita a partir da conversão das variáveis originais de resistividade aparente existentes em dados de condutividade aparente, com unidades expressas mS/m. As figuras 8.27, 8.28 e 8.29 apresentam os mapas de condutividade aparente micronivelados pela técnica de Huang & Fraser (1999) (ver Capítulo 5.3.5), juntamente com as principais unidades geológicas sobrepostas, para as frequências de 935, 4175 e 33000 Hz, respectivamente.

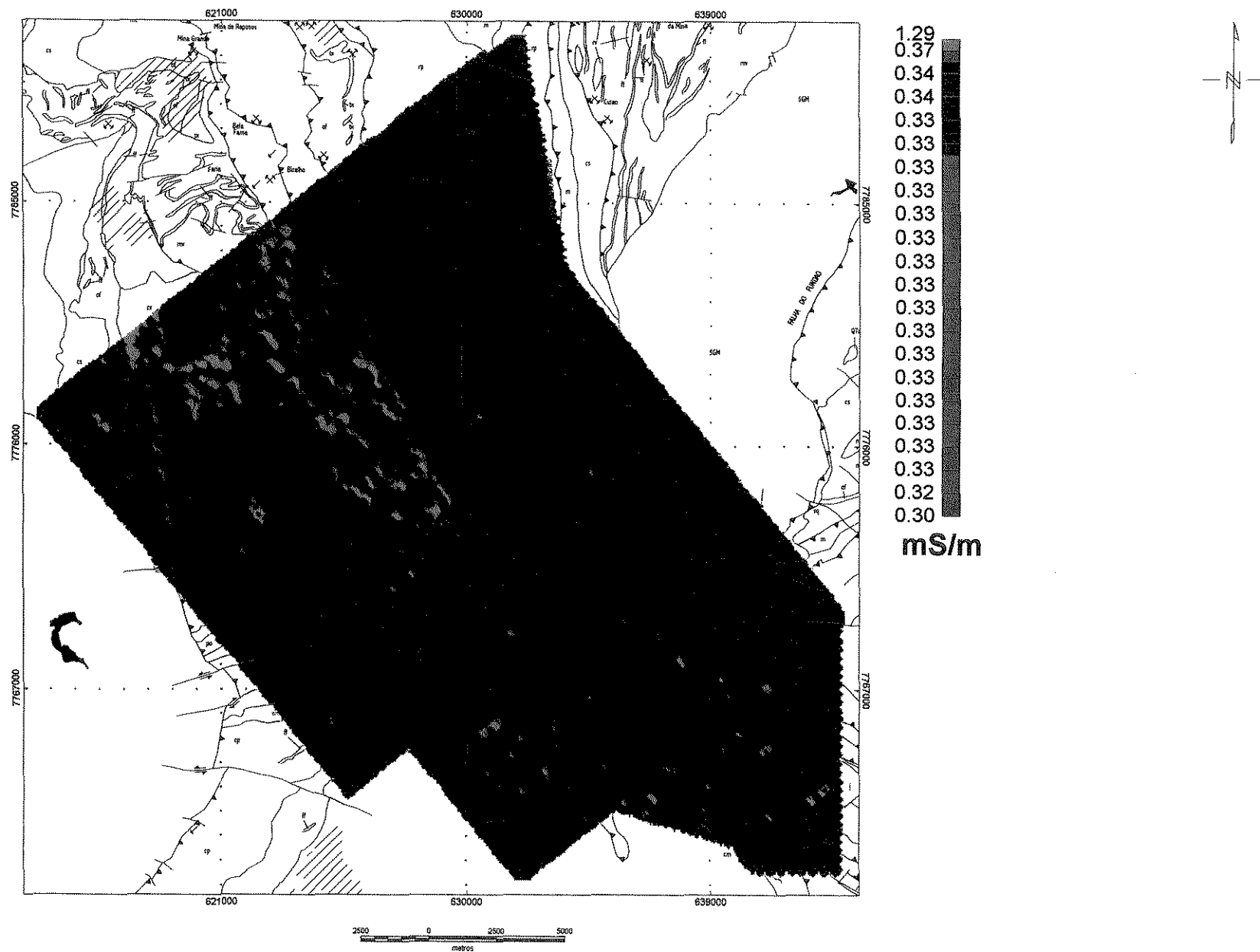


Figura 8.27 - Mapa de condutividade aparente (935 Hz) com contatos geológicos sobrepostos.

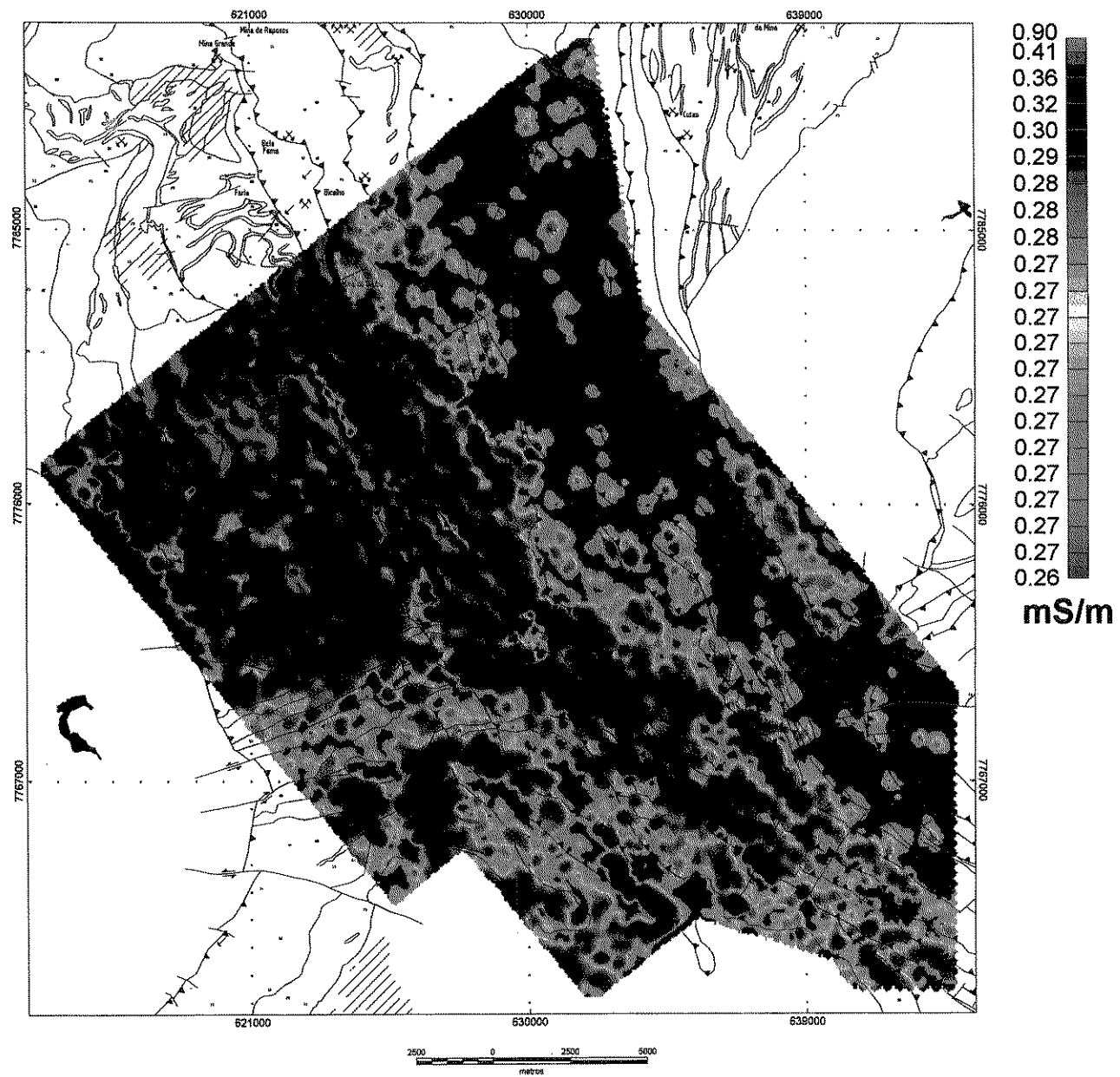


Figura 8.28 - Mapa de condutividade aparente (4175 Hz) com contatos geológicos sobrepostos.

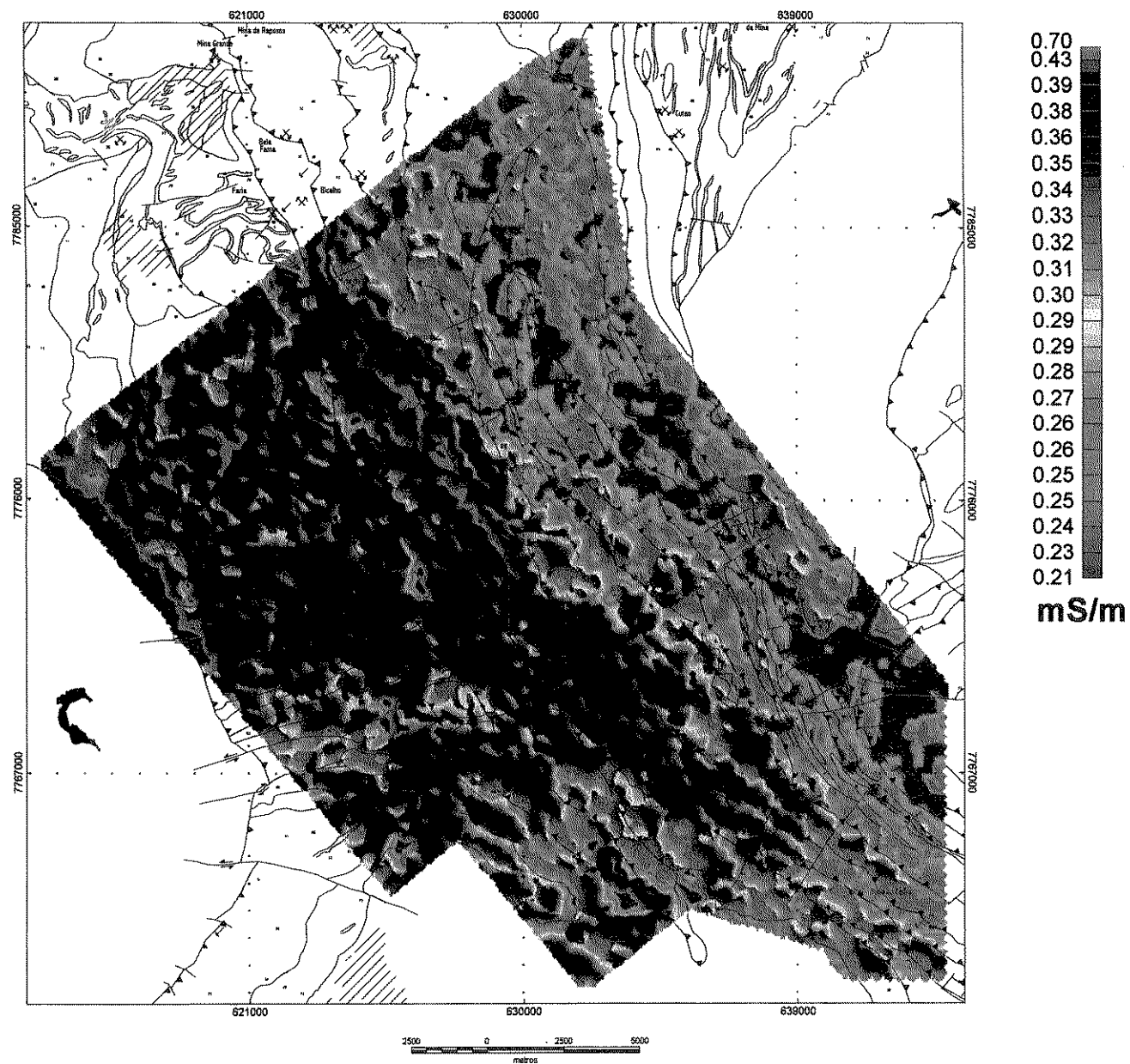


Figura 8.29 - Mapa de condutividade aparente (33000 Hz) com contatos geológicos sobrepostos.

8.8.5.2 - MAPA DE CONDUTIVIDADE APARENTE: 935 HZ

A Figura 8.27 apresenta o mapa de condutividade aparente para a frequência de 935 Hz. Essa frequência permite um maior grau de penetração, nesse caso estimado em 154,81 m para $\rho = 80 \Omega.m$ e 77,41 m para $\rho = 40 \Omega.m$ (Tabela 8.2). No entanto, tal frequência apresenta-se muito susceptível à presença de ruídos, a exemplo do mapa de resistividade aparente original (Figura 8.20). A técnica de micronivelamento aplicada não remove a contento os efeitos dos ruídos de alta frequência inerentes à aquisição dos dados, tão pouco aqueles originados pelas linhas de transmissão elétrica. Esses fatores criam uma séria restrição na representação dos resultados obtidos e sua interpretação, conforme mostra a Figura 8.27.

8.8.5.3 - MAPA DE CONDUTIVIDADE APARENTE: 4175 HZ

O mapa de condutividade aparente para a frequência de 4175 Hz permite um grau de penetração estimado em 34,67 m ($\rho = 80 \Omega.m$) e 17,33 m ($\rho = 40 \Omega.m$) (Tabela 8.2) e apresenta uma quantidade menor de ruídos em relação à frequência 935 Hz (comparar as figuras 8.20 e 8.21). A frequência utilizada limita a profundidade de investigação, apesar das características de arranjo horizontal coplanar. A Figura 8.28 mostra o mapa de condutividade aparente na frequência de 4175 Hz micronivelado onde, de uma forma geral, os valores relativamente médios a altos correspondem às unidades máfica-ultramáficas e metassedimentares pelíticas do GNL. Neste caso, a condutividade está diretamente relacionada ao grau de saturação das coberturas que se desenvolvem sobre as rochas. Os maiores valores de condutividade estão presentes na porção E da área de estudo, em parte relacionados à base do GNL (unidades Ouro Fino e Córrego dos Boiadeiros). Valores semelhantes são encontrados ao longo da ZCSV, representada por um “corredor” de condutividade com valores mais elevados na sua porção N e médios a altos na sua porção S.

8.8.5.4 - MAPA DE CONDUTIVIDADE APARENTE: 33000 HZ

O mapa de condutividade aparente para a frequência de 33000 Hz permite um grau de penetração máximo estimado em 4,39 m (Tabela 8.2) e apresenta uma quantidade menor de ruídos em relação à frequência 935 Hz (comparar as figuras 8.20 e 8.21). O arranjo horizontal coplanar permite um maior grau de penetração e é mais sensível à presença de condutores horizontais. No entanto, a frequência de 33000 Hz não mostra o mesmo desempenho da frequência de 4175 Hz ao compensar o menor grau de penetração, devido à interferência de ruídos de frequência ainda maior. A Figura 8.29 mostra o mapa de condutividade aparente na frequência de 33000 Hz micronivelado onde, apesar da presença de ruídos, os resultados apresentam uma certa correspondência com a interpretação do mapa de condutividade aparente na frequência de 4175 Hz (espessura estimada de 34,67 m).

Discussão:

Com base nos resultados apresentados acima, o arranjo horizontal coplanar na frequência de 4175 Hz revela o melhor desempenho na interpretação dos dados de HEM. Apesar da frequência de 935 Hz estimar uma espessura máxima, em tese, de 154,81 m, o arranjo vertical coaxial permite um menor grau de penetração e é mais sensível à presença de condutores verticais.

De uma forma geral, há uma boa correspondência dos resultados apresentados no arranjo horizontal coplanar na frequência de 4175 Hz com as unidades do GNL, representadas pelas rochas máfica-ultramáficas (base do GNL) e metassedimentares. A ZCSV destaca-se pela presença de um “corredor” de condutividade variada, revelando valores médios a altos na sua porção S, local que coincide com um forte padrão reverso de anomalia magnética (ver item 8.6.4) e com uma zona de intensa alteração hidrotermal verificada nos mapas gamaespectrométricos (item 8.7) e nas investigações de campo.

8.9 - DADOS DE VERY LOW FREQUENCY (VLF)

A utilização do campo eletromagnético medido a partir de transmissores em bandas VLF não é comumente aplicado em áreas de baixa resistividade superficial devido à relação entre a cobertura condutiva, a frequência utilizada no sistema (20 KHz/relativamente baixa) e a pequena profundidade de penetração (Doyle 1990).

O método VLF aplicado no PRV não é exceção. A baixa taxa de sinal recebido das três estações transmissoras (de 15 a 30 KHz), além da presença de ruídos aleatórios não foram satisfatórios, invalidando a interpretação dos resultados.

CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido nessa tese teve como objetivo fundamental caracterizar a resposta geofísica de depósitos de ouro em ambientes favoráveis da Porção Central do Quadrilátero Ferrífero através do processamento e da integração de dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas. Os resultados preliminares apresentados pela CPRM propiciaram investigações geofísicas com avançadas técnicas de tratamento de dados. No entanto, pode-se dizer que os objetivos do Projeto Rio das Velhas não foram totalmente atingidos, pois foi possível identificar correlações entre feições geofísicas e ambientes de mineralização que ainda não tinham sido descritas. Nesse sentido, a relevância do tema aqui tratado foi a exploração criteriosa do potencial informativo dos dados de um projeto de alta resolução subsidiada por duas abordagens metodológicas: a utilização de testes de simulação aplicados em anomalias sintéticas semelhantes às existentes na área para fundamentar os processamentos utilizados, e a incorporação de dados regionais (CGBA) na resolução de questões não respondidas com os dados de alta resolução.

De um modo geral, os dados aerogeofísicos trabalhados (PRV e CGBA) podem ser considerados de excelente qualidade no que se refere às fases de aquisição, pré-processamento e representação espacial. Da mesma forma, os dados digitais geológicos e topográficos permitiram o georreferenciamento e a integração de toda a base de dados trabalhada, facilitando a ligação dinâmica entre os diferentes planos de informação e interpretação dos resultados.

Os resultados apresentados nos estudos de simulação, utilizando anomalias sintéticas geradas por computador, a partir de modelos geológicos específicos, foram essenciais à definição das técnicas de processamento aplicadas aos dados magnetométricos de ambos os projetos aerogeofísicos. Foi possível avaliar o comportamento de vários processamentos em relação à resolução espacial dos dados.

Os efeitos no espectro de potência da anomalia sintética correspondente à sobreposição de prismas causam restrições nas avaliações quantitativas de seus resultados à medida que se efetua uma amostragem em intervalos discretos numa área finita de levantamento. Na prática, essa restrição resultou no truncamento arbitrário de aspectos importantes de anomalias magnéticas e restringiu a determinação dos espectros de fontes no domínio da frequência dos dados do PRV. Desta forma, os resultados foram utilizados apenas como uma indicação preliminar a respeito da profundidade de topo das fontes mais superficiais, cujas anomalias foram completamente amostradas pela janela de dados da área de estudo.

Apesar da redução ao pólo ser uma alternativa à interpretação de dados magnéticos obtidos em outras latitudes magnéticas, pode haver uma restrição na aplicação desse filtro em latitudes magnéticas menores ou próximas à 20° , tal como a da área estudada. Essa restrição não influenciou a análise qualitativa dos dados do CGBA devido ao seu caráter regional e o alto grau de suavização imposto na compilação dos dados pela CPRM. É importante registrar que o avanço constante na qualidade dos levantamentos aeromagnéticos de alta resolução exige um maior controle das técnicas de processamento empregadas para a geração de produtos detalhados de interpretação, para melhorar o posicionamento das fontes magnéticas. Nesta situação, recomenda-se a aplicação da redução ao pólo, juntamente com o cálculo da amplitude do sinal analítico, a título de analisar os resultados obtidos, já que a primeira presume que a direção de magnetização seja conhecida.

A restrição do filtro de redução ao pólo é aumentada principalmente na presença de fontes magnéticas profundas ou externas à janela de dados. Nesse caso, apesar de não haver uma alteração substancial na centralização das anomalias de fontes rasas, há uma distorção marcante nas anomalias correspondentes a fontes externas, que é ainda mais realçada pela existência de ruídos.

Em função das características de baixa latitude magnética (-28°) da área estudada e do padrão complexo na magnetização das rochas, fruto da soma de eventos deformacionais iniciados no Arqueano, o cálculo da amplitude do sinal analítico foi fundamental em duas situações: 1) nos locais onde havia uma suspeita de corpos com direção de magnetização diferente da presumida, 2) nos casos onde o desempenho da redução ao pólo foi comprometido pela baixa latitude magnética. Os resultados da redução ao pólo foram interpretados com cautela e confirmados ou excluídos conforme a interpretação baseada na técnica do sinal analítico.

A qualidade dos dados do CGBA permitiu a interpretação das respostas magnéticas causadas pelas fontes associadas às anomalias de borda da janela de dados do PRV. Os resultados dos processamentos foram satisfatórios e mostraram que a anomalia magnética predominantemente positiva situada na borda W do PRV corresponde a uma fonte magnética dentro da janela de dados. O mapa de anomalia magnética (campo total) dá uma idéia do padrão das anomalias presentes, permitindo uma análise qualitativa preliminar do arcabouço estrutural regional do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. De uma forma geral, o alinhamento geral das anomalias é dominado pelo efeito das ffbs do SGM (Grupo Itabira), embora isto não fique evidente onde essas unidades encontram-se na mesma direção do campo geomagnético terrestre. Isto acontece nas serras do Caraça e da Moeda.

A suspeita de remanescência nas unidades do SGM foi confirmada no mapa de gradiente vertical dos dados reduzidos ao pólo pela manutenção de anomalias dipolares, incompatíveis com o padrão das anomalias esperadas no pólo.

Um dos corpos magnéticos mapeados está associado ao Granodiorito Engenheiro Correia e suas características de contraste magnético obtidas no cálculo da amplitude do sinal analítico, aliadas às informações existentes na literatura, reafirmam a presença de um núcleo formado por dois corpos intrusivos arqueanos preservados no CMB.

A confirmação da presença de uma anomalia de expressiva amplitude do sinal analítico dentro da janela de dados do PRV sugere a presença de rochas magnéticas abaixo do SGRV. O posicionamento desse material seria devido ao cavalgamento das rochas do SGRV (GNL) sobre as unidades do SGM. No entanto, até o momento, não há informações adicionais que corroborem a existência deste material em profundidade.

No que se refere aos dados magnetométricos do PRV, o mapa da anomalia magnética (campo total), basicamente, se caracteriza pela presença de efeitos correspondentes a fontes mais superficiais (comprimento de onda curto) sobrepostos a efeitos causados por fontes mais profundas, cuja expressão é parcialmente mostrada na janela de dados. As anomalias truncadas possuem caráter monopolar e sugerem a existência de fontes com anomalias de padrão normal externas à janela de dados, ou de fontes com magnetização total com forte remanescência situadas no interior da janela do levantamento. Esta indefinição foi resolvida no Capítulo 7 com a incorporação de dados regionais do CGBA, conforme mencionado no parágrafo anterior.

As fontes rasas, entretanto, foram plenamente caracterizadas em meio ao relevo magnético perturbado, no qual se percebe um lineamento N50°W coincidente com a ZCSV, que inflete 60°-70° para W. Observações de campo nas proximidades das minas São Vicente e Paciência confirmaram uma distribuição de magnetita bem formada e achatada segundo o plano de foliação N50°W na porção SE desta zona. Nesta mesma direção observam-se veios de quartzo preenchendo fraturas de extensão de direção NE-SW, além de raras e pequenas lentes (3 cm de largura) de ffbis intercaladas na foliação e imperceptíveis ao levantamento aerogeofísico. A parte S da ZCSV associa-se a uma anomalia magnética com polaridade oposta ao padrão normal, já que apresenta valores positivo ao sul e negativo ao norte desse trecho. Na parte N do lineamento a polaridade da anomalia não pode ser perfeitamente identificada devido ao efeito de sobreposição de anomalias regionais que ocorre na porção NW do mapa.

O mapa de gradiente vertical permitiu uma melhor caracterização da anomalia magnética associada à ZCSV, tornando mais evidente a reversão de polaridade da anomalia magnética sobre a porção S dessa zona, ao contrário da porção N onde predominam anomalias com padrão normal. A reversão de polaridade na parte S sugere que a ZCSV esteja alojando materiais magnéticos com composição e/ou idade distintas, provavelmente originados em eventos geológicos específicos. Considerando o expressivo número de ocorrências auríferas na parte sul do LSV, com teores em ouro de até 15 g/t, pode-se cogitar que o processo de mineralização guarde uma associação com o evento específico que causou o alojamento da formação magnética com atributos de remanescência ao longo da zona de falha. Esta hipótese, sugerida a partir da assinatura da anomalia magnética, deve ser considerada, tanto com fins prospectivos quanto em estudos tectônicos do QF ou referentes à gênese das mineralizações.

No mapa da anomalia magnética reduzida ao pólo observa-se que o processo distorceu a anomalia truncada na porção W da área. Além disso, ruídos são realçados na direção do norte magnético, principalmente nos domínios da anomalia truncada, comprometendo ainda mais a caracterização das anomalias correspondentes às ffb's e às unidades máfica-ultramáficas (cb e of), dificultando a interpretação. O efeito de truncamento compromete a transformação de redução ao pólo que, nestas condições, gera feições sem nenhuma correspondência com a realidade.

O mapa do sinal analítico delimita o contato entre os domínios essencialmente magnéticos característicos das unidades inferior e média do GNL (D1) e os domínios não magnéticos representados pelas rochas essencialmente quartzíticas do GM (D2). Os domínios D3 e D4 estão associados ao Complexo Metamórfico Bação e às unidades magnéticas do SGM, respectivamente. As diversas falhas presentes na ZCSV são preenchidas de forma descontínua por material magnético, possivelmente alojado ao longo das superfícies de empurrão. Os maiores valores da amplitude do sinal analítico na porção S da ZCSV sugerem que essa parte do LSV, além de apresentar remanescência, possui também maior intensidade de magnetização. Foram observadas

diversas falhas de empurrão na porção NE da área também associadas a anomalias magnéticas e que podem ser portadoras de materiais ferromagnéticos. Nenhuma delas, entretanto, apresentou um padrão reverso tão marcante como o verificado na porção S da ZCSV.

No que se refere aos dados gamaespectrométricos, o mapa de contagem total mostrou razoável correlação com o mapa geológico elaborado pela CPRM (1996). As maiores contagens encontradas na área representam os litotipos granito-gnássicos do CMB com medidas superiores a 800 ppm. A associação máfica ultramáfica de composição tholeítica a komatiítica, base do GNL, possui uma boa correspondência com os resultados gamaespectrométricos, sendo caracterizada pelos mais baixas contagens de CT da área. A associação metavulcanossedimentar clástica é caracterizada por um estágio avançado de alteração hidrotermal e não apresentou uma resposta radiométrica específica que permitisse sua individualização. Além disso, o controle estrutural que permeia os estilos de alteração hidrotermal na área dificulta a individualização dessas e de outras unidades. Esse fato foi apresentado no mapa de contagem total, onde se observou uma forte estruturação geral de direção N50°W, semelhante à direção dos principais alinhamentos magnéticos detectados.

Dos resultados gamaespectrométricos, o mapa de distribuição do K foi considerado o elemento rastreador da mineralização, geralmente caracterizado pela presença de halos na zona de alteração hidrotermal, mesmo na presença de veios de quartzo. O mapa de K contribui com a delimitação das áreas afetadas por fenômenos geológicos associados ao enriquecimento desse elemento, revelando uma boa correspondência com as ocorrências de alteração hidrotermal das unidades descritas nos relatórios do mapeamento geológico realizado por Signorelli *et al.* (1993). No entanto, não é observada uma boa correspondência com os litotipos cartografados com auxílio dos dados gamaespectrométricos do PRV, conforme mencionam os mesmos autores, à exceção das unidades máfica-ultramáficas que apresentam concentrações extremamente baixas de K (teores de 0,12 a 0,27%). O Th apresentou-se, freqüentemente, depletado nessas condições e o U revelou um comportamento

variado. É importante mencionar que a alteração hidrotermal é um processo que causa modificações substanciais no conteúdo de radioelementos da rocha encaixante, principalmente do K, podendo acarretar erros de mapeamento litológico. Nesse caso, um detalhamento de campo (mapeamento geológico-estrutural e análise geoquímica) deve ser efetuado de forma complementar, principalmente na reavaliação dos contatos entre as unidades Córrego do Sítio e Rio de Pedras.

No que se refere ao levantamento HEM, o intenso grau de alteração dominante na região estudada afetou consideravelmente as respostas de sistemas eletromagnéticos. Desta forma, as profundidades calculadas foram consideradas como referência geral para um estudo em bases qualitativas, constituindo estimativas mais consistentes que aquelas obtidas por aproximações e que não levam em consideração a natureza dipolar dos campos eletromagnéticos empregados nos levantamentos aerotransportados. As amplitudes dos campos HEM do PRV são da ordem de 20 ppm para frequências mais altas, valores muito inferiores ao esperado teoricamente. No arranjo horizontal coplanar esperam-se, por exemplo, valores na ordem de uma centena de ppm e, nas frequências maiores, de até 600 ppm. A razão dos valores muito abaixo do esperado não pode ser explicada com base na documentação existente a respeito do PRV. Apesar disto, constitui uma questão relevante que deve ser esclarecida, caso iniciativas de interpretação quantitativa sejam tomadas.

Dos resultados dos processamentos dos dados eletromagnéticos, o arranjo horizontal coplanar na frequência de 4175 Hz apresentou o melhor desempenho na interpretação dos dados de HEM. Apesar da frequência de 935 Hz estimar uma espessura máxima, em tese, de 154,81 m, o arranjo vertical coaxial restringiu a penetração e não foi tão sensível à presença de condutores horizontais como no caso do arranjo horizontal coplanar. Esses fatores limitam a utilidade dos resultados obtidos e invalidam parcialmente sua interpretação. O mapa de condutividade aparente para a frequência de 33000 Hz permitiu um grau de penetração máximo estimado em 4,39 m, apresentando uma quantidade menor de ruídos em relação à frequência 935 Hz. Apesar de apresentar o mesmo arranjo da frequência de 4175, a frequência de 33000

Hz não mostrou o mesmo desempenho, devido à interferência de ruídos de frequência ainda maior. Mesmo assim, os resultados apresentaram uma certa correspondência com a interpretação do mapa de condutividade aparente na frequência de 4175 Hz, mas sugerem cautela na sua avaliação.

De uma forma geral, há uma boa correspondência dos resultados apresentados no arranjo horizontal coplanar na frequência de 4175 Hz com as unidades do GNL, representadas pelas rochas máfica-ultramáficas (base do GNL) e metassedimentares. A ZCSV destaca-se pela presença de um “corredor” de condutividade variada, revelando valores médios a altos na sua porção S, local que coincide com um forte padrão reverso de anomalia magnética e com uma zona de intensa alteração hidrotermal verificada nos mapas gamaespectrométricos e nas investigações de campo.

Quanto aos dados de Very Low Frequency, a baixa taxa de sinal recebido das três estações rádio-transmissoras (na faixa de 15 a 30 KHz), além da presença de ruídos aleatórios causaram a invalidação dos dados e, conseqüentemente, da interpretação dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIN, F.F. 1987. Modelo deposicional para os metassedimentos da Serra de Ouro Branco, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Simpósio Sobre Sistemas Depositionais do Pré-Cambriano, Ouro Preto, 1987. *Anais*. Ouro Preto, SBG/Núcleo Minas Gerais. Bol. N° 76, p47-48.
- ALKMIM, F.F. & MARSHAK, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- ALKMIM, F.F. 1985. Sedimentologische, lithostratigraphische und tektonische untersuchungen in der Serra de Ouro Branco, Minas Gerais, Brasilien. Clausthal – Zellerfeld. 217p. (Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Clausthal, RFA).
- ALKMIM, F.F.; BRITO NEVES, B. B. & CASTRO ALVES, A 1993. Arcabouço tectônico do Cráton São Francisco – Uma revisão. In: Dominguez, J. M. L. & Misi, A. Ed. O Cráton do São Francisco. *Anais*. Salvador, E. SBG-SGM-CNPq. P. 45-63.
- ALLDREDGE, L.RVOORHIS, G.D.; DAVIS, T.M. 1963. A magnetic profile around the World. *Journal of Geophysical Research*, 68 (12): 3679.
- ALMEIDA, F.F.M. & HASUI, Y. 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blücher. 542p.
- ALMEIDA, F.F.M. 1976. Estrutura do Pré-cambriano Inferior brasileiro. In: SBG, Congresso brasileiro de Geologia, 29. Ouro Preto, *Boletim de resumos*. P. 201-202.
- ALMEIDA, F.F.M. 1977. O Cráton de São Francisco. *Rev. Bras. de Geociências*, 7 (4): 349 –364.
- ALMEIDA, F.F.M.; BRITO NEVES, B.B. & CARNEIRO, C.D.R. 2000. The origin and evolution of the South American platform. *Earth-Science Reviews* 50, 77-111.

- AMARAL, G. & PASCHOLATI, E. 1998. Transformação dos dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas para uso em integração de dados. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40. *Resumos*. Belo Horizonte, p. 396.
- AMARAL, G.; Cordani, U.G.; Kawashita, K.; Reynolds, J.H. 1976. Potassium argon dates of basaltic rocks from southern Brazil. *Geoch. Cosmoch.*, 30:159-189.
- ARKANI – HAMED, J. 1988. Differential reduction to pole of regional magnetic anomalies. *Geophysics*, 53 (12):1592-1600.
- ARMSTRONG, M. 1998. *Basic linear geostatistics*. Springer-Verlag, Berlim, Alemanha. 157p.
- ATCHUTA RAO, D.; RAM, BABY, H.V. SANKER NARAYAN, P.V. 1981. Interpretation of magnetic anomalies due to dikes: The complex gradient method. *Geophysics*, 46:1572-1578.
- BABINSKI, M.; CHEMALE Jr., F. & VANSCHMUS, W.R. 1993. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: CONGR. BRA. GEOQUÍMICA, 3, São Paulo, 1991. *Anais*. São Paulo, SBG, v.1, p.628-631.
- BARANOV, V. & NAUDY, H. 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to pole. *Geophysics*, 29 (1):67-79.
- BARANOV, V. 1975. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 31:99-121.
- BARBOSA, A.L.M. 1961. Tectônica do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. In: Semana De Estudos Geológicos E Econômicos Do Quadrilátero Ferrífero, Ouro Preto, 1961. *Boletim de resumos*. Ouro Preto, SICEG. V.1, p. 49-52.
- BARBOSA, O. 1949. Contribuição à geologia do centro de Minas Gerais. *Mineração e Metalurgia*, 14 (79): 3-19.
- BARBOSA, O. 1954. "Evolution du Geosinclinal Espinhaço". International Geological Congress. Sect. *Anais*. 13, p. 2-37.
- BELO DE OLIVEIRA, O. V. 1986. As falhas de empurrão e suas implicações na estratigrafia e metalogênese do Quadrilátero Ferrífero. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia, *Anais*, 2:1074-1087.

- BHATTACHARYYA, B. K. 1964. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29:517-531.
- BHATTACHARYYA, B. K. 1966. Continuous spectrum of the total magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic bodies. *Geophysics*, 42:41-50.
- BHATTACHARYYA, B.K. & LEU, L.K. 1975. Analysis of magnetic anomalies over Yellowstone National Park: mapping of Curie-point isothermal surface for geothermal reconnaissance. *Journal of Geophysical Research*, 80:4461-4465.
- BHATTACHARYYA, B.K. & LEU, L.K. 1977. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. *Geophysics*, 42:41-50.
- BHATTACHARYYA, B.K. & MORLEY, L.W. 1965. The delineation of deep crustal magnetic bodies from total field aeromagnetic anomalies. *J. geomag. And Geoelec.*, 17:237-252.
- BLAKELY, R. J. & SIMPSON, R. W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51: 1494-1498.
- BLAKELY, R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge University Press, 441p.
- BOYLE, R.W. 1982. *Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits*. In: *Developments in Economic Geology*, 16, Elsevier, 498p.
- BOSUM, W. 1973. O levantamento aeromagnético de Minas Gerais e Espírito Santo e sua seqüência quanto à estrutura geológica. *Revista Brasileira de Geologia*, 3 (3): 149-159.
- BRACEWELL, R. 1965. *The Fourier Transform and its applications*. McGraw-Hill, New York.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. 1993. Levantamento aéreo, magnetométrico, gamaespectrométrico e eletromagnético. Projeto Rio das Velhas. *Relatório Final*, RJ, PROSPEC, DNPM, 47p.
- BULLOCK, S.J.; ISLES, D.J. 1984. Airborne geophysics in Western Australia. In: *Geophysical signatures of western mineral Australian deposits*. UWA, Publ.c. N° 26. P.85-103.

- CARNEIRO, M. A. 1992. *O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais): litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento da crosta continental do Arqueano*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 233p.
- CHAUVET, A.; FAURE, I.; CHARVET, J. 1994. A three-stage structural evolution of the Quadrilátero Ferrífero: consequences for the Neoproterozoic age and the formation of gold concentrations of the Ouro Preto area, Minas gerais, brasil. *Precambrian Research*, 68: 139-167.
- CHEMALE JR., F.; ROSIERE, C. A.; ENDO, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 65: 25-54.
- CHEMALE JR., F.; ROSIERE, C. A.; ENDO, I. 1991b. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Um modelo. *Pesquisas*, 18 (2): 104-127.
- CHILES, J. P. & GUILLEN, A. 1984. Variogrammes et krigeages pour la gravimetrie et le magnetsme. *Sciences de la Terre, Serie Inform. Et Geolo.*, 20: 445-468.
- CORDANI, U. G. et al. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento na borda sudeste do Quadrilátero Ferrífero. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 52 (4): 785-799.
- CORDANI, U. G.; TEIXEIRA, W. SIGA, Jr. 1980. Geocronologia do Quadrilátero Ferrífero. In: SICEG/ Semana de Estudos da SICEG, 21, Ouro Preto, *Boletim*, 27-44.
- CORDELL, L. & GRAUCH, V.J.S. 1982. Reconciliation of the discrete and integral Fourier transforms. *Geophysics*, 47, 237-243.
- CORRADO, G.; RAPOLLA, A.; GASPARINI, P.; MANTOVANI, M. S. M. 1979. Depth of curie temperature computed from aeromagnetic anomalies in Southeastern Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 9 (1): 33-38.
- CORRÊA NETO, A V.; BALTAZAR, O. F. 1995. Compartimentação Estrutural do Greenstone Belt Rio das Velhas no interior do Quaadrilátero Ferrífero, MG. In: V Simp. Nac. Est. Tect., Gramado. *Boletim de Resumos Expandidos*. Gramado, SBG, Núcleo RS. P. 15-17.

- CORRÊA NETO, A V.; BALTAZAR, O. F.; PIRES, F. R. M. 1997. Quantificação da deformação na parte central do *Greenstone Belt* Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Mg. In: SBG/ Núcleo Brasília, VI Simp. Nac. Est. Tect., Pirenópolis. *Boletim de Resumos Expandidos*. p. 222-224.
- CORRÊA NETO, A V.; BALTAZAR, O. F.; SILVA, S. L. 1994. Evolução Estrutural do setor setentrional do Greenstone-Belt Rio das Velhas (MG). In: SBG, Congr. Bras. Geol., 31, Camboriú, SC, *Anais*, v.1, p. 69-70.
- CORRÊA NETO, A V.; DAYAN, H. 1998. Deformation analysis on the Rio das Velhas Greenstone-Belt, Quadrilátero Ferrífero (MG). In: International Conference on Precambrian and Craton Tectonics, Ouro Preto, Mg. *Abstracts*. Ouro Preto, UFOP, IBTA. p. 128-130.
- CORRÊA NETO, A V.; DAYAN, H.; BRAGA, M. V. C. 1998. Análise da deformação em metaconglomerados da Formação Casa Forte na parte central do Grenstone-Belat Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero (MG). In: SBG, Congr. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, MG. *Resumos Expandidos*. p.52.
- CPRM 1993. *Geologia. Levantamentos aerogeofísicos. Catálogo de produtos e serviços*. Versão Preliminar. CPRM, Rio de Janeiro, RJ, 119p.
- CPRM 1996. *Geologia. Levantamentos aerogeofísicos. Projeto Rio das Velhas. Mapa geológico integrado. Escala 1:100000. Texto Explicativo*. CPRM, BH, MG.122p.
- DENTITH, K.F.; FRANKCOMBE, S.E.; ; HO, J.M.; GROVES, D.L.; TRENCH, A. 1984. *Geophysical signatures of western mineral australian deposits*. UWA, Public. Nº 26. 454p.
- DERBY, O. 1906. The Serra do Espinhaço, Brazil. *Jour. Geol.* 14 (3):357-401.
- DICKSON, M.C.; SCOTT, B. L K.M. 1997. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17 (2): 187-200.
- DNPM 1974. Retrospectivas das Atividades do Convênio Brasil-Alemanha e trabalhos do Centro de Geofísica Aplicada. *Boletim do Ministério das Minas e Energia*. DNPM, Brasília.
- DNPM 1978. Informações sobre levantamentos aerogeofísicos executados para o DNPM inclusive em convênio com a Nuclebrás. *Seção Geofísica:2*, DNPM, Brasília, maio. 64 p.

- DOBRIN, M. B.; SAVIT, C. H. 1988. *Geophysical Prospecting*. New York, McGraw Hill. 867 p.
- DOOR, J.V.N. II & BARBOSA, A.L.M. 1963. Geology and ore deposits of the Itabira district, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 341-c. 110p.
- DORR, J. V. N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S.G.S. Professional Paper*, 341A. 110p.
- DORR, J. V. N.; GAIR, J. E.; POMERENE, J. B.; REYNARDSON, G. A. 1957. *Revisão estratigráfica pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil*. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 31 p.
- DOYLE, H. 1990. Geophysical exploration for gold – a review. *Geophysics*, 2 (55): 134-146.
- DUARTE, O.O. 1997. *Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia*. Rio de Janeiro. SBGf. 304p.
- DUVAL, J.S.; COOK, B.; ADAMS, J.A.S. (1971) Circle investigation of an airborne gamma-ray spectrometer. *J. Geophys. Res.*, **76**, 8466-8470.
- DUVAL, J.S. 1983. Composite color image of aerial gamma-ray spectrometric data. *Geophysic Journal*, 48(6):722-735.
- EBERLE, D. 1995. Técnica e metodologia da utilização do método eletromagnético "RADIOHM" através de aplicações em projetos do centro de geofísica aplicada. In: Seminário sobre técnicas exploratórias em geologia. *Anais*. Gravatal, MME/DNPM. P.337-389.
- EFIMOV, A.V. 1975. Multiplikativnyi pokazatel dlya videleniya endogennykh rud po aerogamma-spektrometricheskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, edited by: Nauchno-proizvodstvennoye obiedinenie "Geofizika" Leningrad.
- ENDO, I. & CARNEIRO, M.A 1996. O Regime Tectônico do Neoarqueano no Quadrilátero Ferrífero: Um modelo transpressional. In: Congr. Brás. Geol., 39, Salvador/BA. *Anais*. Salvador, SBG. v.1.p. 414-416.
- ENDO, I. & FONSECA, M. A 1992. Sistema de cisalhamento Fundação-Cambotas no Quadrilátero Ferrífero, MG: geometria e cinemática. *Revista da Escola de Minas*, 45 (1/2): 28-31.

- ENDO, I. & MACHADO, R. 1998. The geologic architecture of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) after multiple transpressional and transtensional tectonic events. In: International Conference on Precambrian and Craton Tectonics, Ouro Preto, MG. *Abstracts*. Ouro Preto, UFOP, IBTA. p. 126-127.
- ENDO, I. 1988. *Análise Estrutural qualitativa no minério de ferro e encaixantes na Mina de Timbopeba – borda leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana, MG*. Dissertação e Mestrado. DEGEO/UFOP. 112p.
- ENDO, I. 1997. *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, IG/USP. 243p.
- ENDO, I.; CARNEIRO, M.A & OLIVEIRA, C. G. de (1996a) Tectônica transcorrente – NS de idade Neoarqueana no Quadrilátero Ferrífero, MG. In: Congr. Bras. de Geol., 39, Salvador/BA. *Anais*. Salvador, SBG. v.1.p. 437-439.
- ENDO, I.; CARNEIRO, M.A & OLIVEIRA, C. G. de (1996b). O Complexo Metamórfico Bação: Um Elemento Estrutural Anisotrópico na Deformação do Supergrupo Rio das Velhas – Q.F., MG. In: Congr. Bras. de Geol., 39, Salvador/BA. *Anais*. Salvador, SBG. v.1.p. 411-413.
- FEBOLI, W.L.; SIGNORELLI, N. 1993a. *O Supergrupo Rio das Velhas na Folha Rio Acima (SF.23-X-A-III-1-NE)*. Texto Explicativo. In: CPRM, 1996. Projeto Rio das Velhas – Mapa Geológico Integrado (Texto Explicativo). Programa Estudos de Distritos Mineiros. Convênio DNPM-CPRM. Belo Horizonte. p. 1-20.
- FEBOLI, W.L.; SIGNORELLI, N. 1993b. *Sinopse da Folha Itabirito*. CPRM, 1996. Projeto Rio das Velhas – Mapa Geológico Integrado (Texto Explicativo). Programa Estudos de Distritos Mineiros. Convênio DNPM-CPRM. Belo Horizonte. p. 34-43.
- FERRAND, M. P. 1894. *L'Or a Minas Gerais. Brésil. Belo Horizonte, MG*, v. 1.
- FRASER, D.S. 1978. Resistivity mapping with an airborne multicoil electromagnetic system. *Geophysics*. 43(1):144-172.
- FRASER, D.S. 1979. The multicoil II electromagnetic system. *Geophysics*. 44(8):1367-1394.

- GAIR, J.E. 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. Professional Paper, 341-5a. 65 p. *Geophysical Prospecting*, 132: 336-346.
- GEOSOFT 1997a. Microleveling using FFT decorrugation. Geosoft Tech. Note. p. 1-4.
- GEOSOFT. 1997b. *MagmapTM (FFT-2D) 2-D Frequency domain processing of potentional field data*. User guide. Geosoft Inc., Toronto, Canada. 54 p.
- GEOSOFT. 1999. *OASIS montajTM Data Processing and Analisis (DPA) System. V4.3*. Geosoft Inc., Toronto, Canada.
- GOMES, N. S. 1986. Determinações geotermométricas e geobarométricas em paragênese minerais de alto grau metamórfico no Complexo do Bação, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Congr. Brás. Geol., 34, Goiânia/GO. *Anais*, V.4, p. 1424-1436.
- GNOJEK, I.; PRICHYSTAL, A. 1985 A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectroscopy in Northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, 23, 491-502.
- GROVES, D.I.; PHILIPS G.N.; FALCONER, L.J.; HPOUSTON, S.M.; HO, S.E.; BROWNING, P.; DAHL, N.; McNAUGHTON N.J. 1987. Evidence of an epigenetic origin of Bif-hosted gold deposits in greenstone belts of the Ylgarn Block, Western Australia. In: HO, SE.; GROVES, D.I. (eds.) *Advances in understanding precambrian gold deposits*. Geology Department & University Extension, The University of Western Australia , Publication 11, 167-179.
- GUILD, P.W. 1957. Geology and Mineral resources of the Congonhas district, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. Professional Paper, 290. 90 p.
- GUIMARÃES, D. 1931. Contribuição à geologia do estado de Minas Gerais. Serv. Geol. Min. do Brasil, 36p. *Boletim* 55.
- GUIMARÃES, D. 1951. Arqui-Brasil e sua evolução geológica. Brasil. Dep. Nac. Prod. Miner., Div. Fom. Prod. Miner., *Boletim* 88, Rio de Janeiro, 80p.
- GUIMARÃES, D. 1966. Contribuição à geologia do Estado de Minas Gerais. Serviço Geológico do Ministério do Brasil. 36 p. *Boletim* 55.
- GUIMARÃES, D. 1966. Contribuição ao estudo do polimetamorfismo da Série Minas. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. 54p. (*Avulso* 90).

- GUNN, P. 1997. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17 (2): 105-113.
- GUNN, P. 1998. *Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys*. Apostila de curso. Australian Geological Survey Organization (AGSO), Canberra, Au.
- GUNN, P. MACKEY, T. & MEIXER, T. J. 1998. *Interpretation of the results of the Fiji Airborne Geophysical Project*. Submetido à AusAID.
- GUNN, P.; MAIDMENT, D. & MILLIGAN, P. R. 1997. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17 (2): 175-186.
- HANSEN, R.O. & PAWLOWSKI, R.S. 1989. Reduction to the pole at low latitudes by Wiener filtering. *Geophysics*, 54, 1607-1613.
- HARALYI, N. L. E. & HASUI, Y. 1982a. The gravimetric information and the Archean-Proterozoic structural framework of the Eastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 12 (1-3): 160-166.
- HARDER, E. C. & CHAMBERLIN, R. T. 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geology*, 23: 341-378.
- HERZ, N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. *Professional Paper*, 641-B. p. 1-58
- HERZ, N.; HURLEY, P.M., PINSON, W.H. & FAIRBAIRN, H.W. 1961. Age Measurements of Brazilian Shield. *Geological Society American Bul.* 72: 1111-1120.
- HIPPERTT, J.F. 1994. Structures indicative os helicoidal flow in a migmatitic diapir (Bação Complex, southeastern Brazil). *Tectonophysics*, 234, 169-196.
- HOOVER, D.B.; PIERCE, H.A. (1990) – Annotated bibliography of gamma-ray methods applied to gold exploration. *Open-File Report* 90-203.
- HOOVER, D.B.; HERAN, W.D.; HILL, P.L.. 1992. The geophysical expression of selected mineral deposits models. *Open-file report* 92-557. USGS. 129p.
- HOUSE, M.; DENTITH, M.; TRENCH, A.; GROVES, D. & MILLER, D. 1999. Structure of the highly mineralized late-Archean granitoid-greenstone terrain and the underlying crust in the Kambalda-Widimooltha area, Western Australia, from the integration of geophysical datasets. *Exploration Geophysics*, 30(1-2): 50-67.

<http://www.cprm.gov.br/aero/1000/aero1000.htm>.

<http://www.cprm.gov.br/aero/.3000/aero3000.htm>.

HU, J. 1995. Methods for generating surfaces in environmental GIS applications. ERSI User's Conference. *Proceedings*. Palm Springs, USA.

IAGA Division V Working Group 8. 1996. International Geomagnetic Reference Field, 1995. *Revision. Pageoph*, 147(1): 195-202.

HUANG, H.P.; FRASER, D.C. 1999. airborne resistivity data leveling. *Geophysics*, 64(2): 378-385.

ISLES, D. J.; HARMAN, P. G. & CUNNEEN, J. P. 1989. The contribution of high resolution aeromagnetics to archean gold exploration in the Kalgoorlie Region, Western Australia. *Economic Geology Monograph*, 6: 389-397.

JAKES, A.L.; WELLMAN, P.; WHITAKER, A.; WYBORN, D. 1997. High-resolution geophysics in modern geological mapping. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): 159-173.

JOURNEL, A. G. & HUIJBREGTS, C. J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press. 600 p.

KEATING, P.; ZERBO, L. 1996. An improved technique for reduction to the pole at low latitudes. *Geophysics*, (61):131-137.

LADEIRA, E. A; VIVEIROS, J. F. M. 1984. Hipótese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis. *Boletim Especial*, BH, SBG-MG, 4: 1-14.

LADEIRA, E.A 1985. Metalogênese do ouro da Mina de Morro Velho e no distrito Nova Lima. Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. *Boletim Especial*, Contribuições à Geologia e Petrologia. SBG-MG: 95-151.

LADEIRA, E.A 1988. Metalogenia dos depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Principais Depósitos Minerais Do Brasil*. DNPM. v. 3, p. 301-371.

LADEIRA, E.A. 1980. *Metallogenesis of gold at the Morro Velho Mine and the Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Univ. Western Ontário. Tese de Doutorado. 272 p.

- LADEIRA, E.A. 1991. Genesis of gold in Quadrilátero Ferrífero: a remarkable case of permanency, recycling and inheritance. A tribute to Djalma Guimarães, Pierre Routhier and Hans Ramberg. In: LADEIRA, E.A. (ed.), Brazil Gold'91. *Anais* Balkema, Rotterdam, p. 11-32.
- LANGEL, R.A. 1992. International geomagnetic reference field: the sixth generation. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 44, 679-707.
- LEITE, L.W.B. 1998. *Introdução a análise espectral em geofísica*. MCT/CNPq/PADCT-II/GTM, Belém, Pará. 424p.
- LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. 1995. *Geofísica de Prospeção*. 1ª ed. CEJUP, Belém, 311 p.
- LUYENDYK, A. P. J. 1997. Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): 31-38.
- MACHADO, N. & CARNEIRO, M. 1992. U-Pb evidence of late Archean tectono-thermal activity in southern São Francisco shield, Brazil. *Can. J. Earth Sci.*, 29: 2341-2346.
- MACHADO, N. & SCHRANK, A. 1989. geocronologia U-Pb no Maciço Piumhi: Resultados preliminares. Soc. Bras. Geol. Núcleo de Minas Gerais. Simp. Geol. de MG. *Anais*, p. 45-49.
- MACHADO, N.; NOCE, C. M.; LADEIRA, E. A & BELO DE OLIVEIRA, O. 1992. U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco craton, Brazil. *Geo. Soc. AM. Bull.*, 104: 1221-1227.
- MACHADO, N.; SCHRANK, A; ABREU, F. R. DE; KNAUER, L. G.; ABREU, P.AA. 1989. Resultados Preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço Meridional. In: Soc. Bras. Geol. Núcleo de Minas Gerais. Simp. Geol. de MG. *Anais*, p. 1-15.
- MACHADO, N.; SCHRANK, A; NOCE, C. M. & GAUTHIER, G. 1996. Age old detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basins in Quadrilátero Ferrífero, SE, Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 259-276.

- MAcLEOD, I. N.; JONES, K.; TING FAN DAÍ 1993. 3-D analitical signal in the interpretation of total magnetic data at low magnetic latitudes. *Exploration Geophysics*, 24: 679-688.
- MAcLEOD, I. N.; VIEIRA, S.; CHAVES, A C. 1993. Analitic signal and reduction-to-the-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. Congr. Bras. de Geofísica. *Anais*. Rio de Janeiro, SBGf.
- MANTOVANI, M. S. M.; SCHUKOWSKY, W. 1983. The use of aeromagnetic data in regional crustal studies at low latitudes: case study. *Revista Brasileira de Geofísica*, (2): 1-10.
- MARES, E. 1984. *Introduction to Applied Geophysics*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 574 p.
- MARINI, O. J. 1993. Filosofia do Programa Distritos Mineiros do DNPM e aerogeofísica prospectiva: o exemplo do Projeto Rio das Velhas. In: Congr. Int. da Soc. Bras. De Geof., 3. *Anais*. Rio de Janeiro, V. 1. p. 434-438.
- MARSHAK, S. & ALKMIM, F. F. 1989. Proterozoic Contractional Extension Tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8 (3): 555-571.
- MARSHAK, S.; ALKMIM, F. F. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- MARSHAK, S.; ALKMIM, F. F.; JORDT-EVANGELISTA, H. 1992. Proterozoic crustal extension and the generation of dome-and-keel structure in an archaean granite-greenstone terrane. *Nature*, 357:491-493.
- MARSHAK, S.; THINKHAM, D.; ALKMIM, F. F.; BRUECKNER, H.; BORNHORST, T. 1997. Dome and keel provinces formed during Paleoproterozoic orogenic collapse-diapir cluster or core complexes? Examples from the Quadrilátero Ferrífero (Brazil) and the Penokean Orogen (USA). *Geology*, 25: 415-418.
- MENDONÇA, C. A.; SILVA, J. B. C. 1993. A stable truncate series approximation of the reduction-to-the-pole operator. *Geophysics*, 58 (8): 1084-1089.

- MENEZES FILHO, M. R.; MATTOS, G. M. M. & FERRARI, P. G. 1977. Projeto Três Marias. Belo Horizonte, DNPM/CPRM (*Relatório Final*).
- MILLIGAN, P. R.; GUNN, P. J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17 (2): 63-75.
- MILSON, J. 1996. *Field geophysics*. John Wiley & Sons. NY. 187 p.
- MINTY, B. R. S. 1991. Simple micro-leveling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, 22: 591-592.
- MINTY, B. R. S.; LUYENDYK, A. P. J.; BRODIE, R. C. 1997. Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17 (2): 51-62.
- MORAES, L. C. & BARBOSA, O. 1939. Ouro no centro de Minas Gerais. Rio de Janeiro, Serviço de Publicidade Agrícola. DNPM. *Boletim* 38. 187 p.
- MORRIS, R. F. C. 1988. *The radar structure of Brazil south of the amazon Basin, with the special emphasis on the structural setting of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais State*. Kingston. V. 1, 273 p. (PhD. Thesis, Kingston, Ontario, Canada).
- MOTTA, A.C.; GOMES, R. A A D.; DELGADO, I. M.; SIQUEIRA, L. P.; PEDREIRA, A J. 1981. Feições gravimétricas e magnéticas do Cráton do São Francisco. In: Simpósio sobre o Cráton São Francisco e suas faixas marginais, 2, Salvador, *Anais*, p. 17-33.
- MUNDRY, E. 1984. On the interpretation of airborne eletromagnetic data for the two layer cases. *Geophysical Prospecting*. 32:336-346.
- NABIGHIAN, M. 1987. *Eletromagnetic methods in applied Geophysics*. 2 ed. Tulsa, SEG, v.1, 513p.
- NABIGHIAN, M. N. 1988a. *Eletromagnetic Methods In Applied Geophysics*. SEG, Tulsa. Vol. 1. 513 p.
- NABIGHIAN, M. N. 1988b. *Eletromagnetic Methods In Applied Geophysics*. SEG, Tulsa. Vol. 2. 972 p.
- NABIGHIAN, M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517.

- NABIGHIAN, M.N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section. *Geophysics*, 39, 85-92.
- NABIGHIAN, M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations. *Geophysics*, 49, 780-786.
- NOCE, C.M. 1995. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado. 128p.
- NOCE, C.M.; CARNEIRO, A.M.; MACHADO, N. & TEIXEIRA, W. 1996. Late Archean granitoids of the Quadrilátero Ferrífero region: U-Pb geochronology and implications on crustal evolution. In: Symp. Archean Terranes Of The South American Plataform. *Extended Abstracts*. Brasília, SBG. P. 60-61.
- NOCE, C.M.; PINHEIRO, S.O. LADEIRA E.A.; GROSSI Das, J.H. 1990. Ocorrência de metakomatiitos com textura "spinifex" no Grupo Nova Lima, oeste do Quadrilátero Ferrífero. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 36, *Bol. Resumos*. P.215.
- NOCE, C.M.; PINHEIRO, S.O.; LADEIRA, E.A.; FRANCA, C.R. & KATTAH, S. 1992. A seqüência vulcanossedimentar do Grupo Nova Lima na região de Piedade do Paraopeba, oeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(2): 175-183.
- O'ROURKE, J. E. 1957. *The stratigraphy of the metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela Quadrangles, Minas Gerais, Brazil*, Wisconsin. PhD Thesis. University of Wisconsin, USA 106p).
- OLIVEIRA, A H. & GUITARRARI, M. M. 1996. *Aspectos tectono-estratigráficos de um fragmento dos terrenos granito-greenstone do Quadrilátero Ferrífero situado entre Itabirito e Rio Acima: Área 1*. DEGEO, EM, UFOP, Ouro Preto, MG, Trabalho de Graduação, 77 p.
- OLIVEIRA, G. A., CLEMENTE, P. L., VIAL, D. S. 1983. Excursão à Mina de Ouro de Morro Velho. In: Simp. Geol. Minas Gerais, 2, Belo Horizonte, 1983, SBG. *Anais*. Belo Horizonte, 3, 497-505.

- OLIVEIRA, G.A.I.; CLEMENTE, P.L.C. & VIAL, D.S. 1983. Excursão à Mina de Ouro de Morro Velho. In: *Simp. Geol. Minas Gerais, 2, Belo Horizonte, 1983, SBG. Anais. Belo Horizonte, 3, 497-505.*
- OLIVEIRA, O.A.B. & VIEIRA, M.B.H. 1987. Aspectos da deformação dúctil e progressiva no Quadrilátero Ferrífero. In: *Simp. Geol. Minas Gerais, 4, Belo Horizonte, 1987. Anais... Belo Horizonte, SBG/NMG. p. 237-253.*
- OLIVEIRA, O.A.B. 1986. As falhas de empurrão e suas implicações na estratigrafia e metalogênese do Quadrilátero Ferrífero. In: *Congr. Bras. Geol., 34, Goiânia, 1986. Anais... Goiânia, SBG. v.2, p. 1074-1087.*
- OSTROVSKI, E.Ya. 1975. Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its use in aerogamma. *Internat. Geology Rev.*, **17(4)**: 461-469.
- PADILHA, A. V. 1983. Interpretação de anomalias aeromagnéticas da região do Quadrilátero Ferrífero. *Revista Brasileira de Geofísica*, **1 (3)**: 31-38.
- PADILHA, A. V. 1984. Formação Córrego dos Boiadeiros - Uma sequência komatiítica na Base do Grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas - Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. In: *Cong. Bras. De Geol., 33. Anais. Rio de Janeiro, RJ. 1984. v.6: 2668-2679.*
- PALACKY, G.J. 1988. Resistivity characteristics of geologic targets. In: Nabighian, M. 1992. *Eletromagnetic methods in applied geophysics*. 2 ed. Tulsa, SEG, v.1, 513p.
- PALACKY, G.J.; KADEKARU, K. 1978. Efeito do Intemperismo tropical nos levantamentos eletromagnéticos. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 30, Recife, *Anais*, **5**:2323-2335.
- PALACKY, G.J.; SENA, F.O. 1962. Conductor identification in tropical terrains-case histories from the Itapicuru Greenstone Belt, Bahia, Brazil. *Geophysics*. **44(12)**:1941-1962.
- PALACKY, G.J.; WEST, G.F. 1992. Airborne eletromagnetic methods. In: Nabighian, M. 1992. *Eletromagnetic methods in applied geophysics*. 2 ed. Tulsa, SEG, v.2, 971 p.

- PINTO, C. P.; CARVALHAES, J. B.; BALTAZAR, O. F. 1996. Projeto Rio das Velhas – Mapa Geológico Integrado, Escala 1:100.000, *Texto Explicativo*. Belo Horizonte, DNPM/CPRM, 122 p.
- POMERENE, J. B. 1964. Geology and ore deposits of Belo Horizonte, Ibirité and Macacos quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol. Survey Professional Paper*, 341-E, 58 p.
- REEVES, R. G. 1966. Geology and mineral resources of the Monlevade and Rio Piracicaba quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol. Survey Professional Paper*, 341-D, 84 p.
- REMACRE, A. & BRAGHIN, M. 1997. Interpolation for aeromagnetic data using magnetic variogram for kriging. In: CONG. INT. Da SOC. BRAS. GEOF., São Paulo, SP. *Resumos Expandidos*. Vol. II, p. 747-749.
- REMACRE, A. & UZUMAKI, E. T. 1996. Variogramas para a interpolação em geofísica. *Revista Brasileira de Geociências*, 15 (1): 17-39.
- RICARD, Y. & BLAKELY, R.J. 1988. A method to minimize edge effects in two-dimensional discrete Fourier transforms. *Geophysics*, 53 (8), 1113-1117.
- RICOMINI, C. 1982. Geologia regional do Quadrilátero Ferrífero, MG (Brasil). In: CONG. BRAS. GEOL., 32, Salvador, Bahia. *Anais...* Salvador, SBG. Vol.1, p. 199-213.
- RICOMINI, C.; AMARAL, G. 1980. Estruturas circulares internas no Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero (MG). In: Cong. Bras. Geol., 31, Camboriú, SC. *Anais...* Camboriú, SBG. V.6, p. 2975-2981.
- ROBINSON, E.S.; ÇORUH, C. 1988. *Basic Exploration Geophysical*. John Wiley and Sons. NY. 562 p.
- ROEST, W. R.; VERHOEF, V. & PILKINGTON, M. 1992. Magnetic interpretation using the 3D analytical signal. *Geophysics*, 57: 113-125.
- ROEST, W.R. & PILKINGTON, M. 1993. Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58, 653-659.
- ROLIM, S. B. A. & AMARAL, G. 1998. Caracterização geofísica de mineralizações auríferas associadas a terrenos arqueanos, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: CONG. BRAS. GEOL., XL. Belo Horizonte, SBG. *Resumos* P.127.

- ROMANO, A.W. 1989. *Évolution tectonique de la région NW du Quadrilatère Ferrifère – Minas Gerais – Brésil (Geochronologie du socle – Aspects géochimiques et pétrographiques des Supergroupes Rio das Velhas e Minas)*. Nancy. 259p. (Thèse Doucteur, Université de Nancy I).
- RYNEARSON, G. A.; POMERENE, J. B. & DORR II, J. V. N. 1954. Contacto basal da Série de Minas na parte ocidental do Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, Brasil. DNPM-DGM, *Avulso* 34, 18 p.
- SANT'ANNA, M. V. & MAGALHÃES, P. C. V. 1992. *Metamorfismo do Grupo Nova Lima no contato com o Complexo Bação, na sua borda leste*. DEGEO, EM, UFOP, Ouro Preto, MG, Trabalho de Graduação, 63 p.
- SAVOSIN, S.I.; CHEPIZHNYA, E.A.; GUZHOVA, N.G. 1977 – *Distribution of radioactive elements in rocks and ores of some Uzbekistan gold-ore deposits*. Yesesoyuznyi Nauchno-Isledovatel'ski Institut Yardenoi Geofiziki i Geokhimii.
- SCHORSCHER, H. D. 1976. Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na região de Itabira, Minas Gerais, Brasil. In: Congr. Bras. Geol., 29. Ouro Preto, 1976. *Boletim*, Ouro Preto, SBG. P. 194-195.
- SCHORSCHER, H. D. 1978. Komatiitos na estrutura "greenstone belt" Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais Brasil. In: Congr. Bras. Geol., 30. Recife, 1978. *Resumo de Comunicações*, p. 292-293.
- SCHORSCHER, H. D., SANTANA, F. C., POLÔNIA, J. C., MOREIRA, J. M. P. 1982. Rio das Velhas Greenstone Belt and Proterozoic Rocks, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais State. In: Int. Symp. on Archean and Early Proterozoic Geological Evolution and Metallogenesis (ISAP), Salvador, BA, Brazil. *Excursion Annex*, 44p.
- SCHORSCHER, H.D. 1979 (a). Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento arqueano do Quadrilátero Ferrífero. *Anais da Academia Brasileira de Geociências*, 51, 767-768.
- SCHORSCHER, H.D. 1979 (b). Evolução arqueana e proterozóica do Quadrilátero Ferrífero e de partes meridionais da Serra do Espinhaço. In: 1º Simpósio sobre a geologia do Cráton de São Francisco e de suas Faixas Marginais, *Resumos*, Salvador.

- SCHRANK, A.; MACHADO, N. 1996. Idades U-Pb em monazitas e zircões da Mina Morro Velho e passagem de Mariana, quadrilátero Ferrífero, (MG). In: SBG, Cong. Bras. Geol., 39, Salvador, *Anais*, 6:470-472.
- SCHRANK, A & SOUZA FILHO, C. R. de 1998. The Tectonic Evolution of the Quadrilátero Ferrífero Region from the Archean to the Neoproterozoic: Revision, Problems and Prospects. In: 14 International Conference on Basement Tectonics. *Anais*. Ouro Preto, Brazil, p. 122-125.
- SCHRANK, A. & SILVA, M. G. 1993. *Greenstone Belts do Cráton do São Francisco, Brasil*. In: DOMINGUEZ, J. M. L. & MISI, A. Ed.
- SEGUIN, M. K. 1971. Discovery of direct-shipping iron ore by geophysical methods in the central part of the Labrador Trough. *Geophysical Prospecting*, 19: 459-487.
- SHARMA, P. V. 1986. *Geophysical Methods in Geology*. Amsterdam, Elsevier, 2^a ed. 442 p.
- SHUANG, Q. 1994. An analytic signal approach to the interpretation of total field magnetic anomalies. *Geophysical Prospecting*, 42: 665-676.
- SIGNORELLI, N.; FÉBOLI, W. L.; SILVA, J. N. da; CORRÊA NETO, A V. 1993. *Sinopse da Folha Rio de Pedras*. In: CPRM, 1996. Projeto Rio das Velhas – Mapa Geológico Integrado (Texto Explicativo). Programa Estudos de Distritos Mineiros. Convênio DNPM-CPRM. Belo Horizonte p 44-54.
- SILVA, A.M. 1999. *Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero*. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 194p.
- SILVA, J. B. C. 1986. Reduction to the pole as na inverse problem and its application to low-latitude anomalies. *Geophysics*, 51 (2): 369-382.
- SILVA, J. N. da. 1996. *O Supergrupo Rio das Velhas na Folha Gandarela (SF.23-X-A-III-2-NO*. Texto Explicativo. In.: CPRM, 1996. Projeto Rio das Velhas – Mapa Geológico Integrado (Texto Explicativo). Programa Estudos de Distritos Mineiros. Convênio DNPM-CPRM. Belo Horizonte p 1-20.

- SOUZA FILHO, C.R. 1991. *Metalogênese do ouro em zona de cisalhamento. Área Tinguá, "Greenstone Belt" Rio das Velhas, MG.* Campinas, 254p. (Dissertação de Mestrado, DMG-UNICAMP).
- SPECTOR, A. 1968. *Spectral analysis of aeromagnetic data.* Ph.D. Thesis. Department of Physics. University of Toronto. Canada.
- SPECTOR, A. 1985. Comment on "statistical methods for interpreting aeromagnetic data by A. Spector and F. S. Grant. *Geophysics*, 50: 2285.
- SPECTOR, A.; GRANT, F.S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35 (2): 293-302.
- SWAIN, C.J. 2000. Reduction-to-the-pole of regional magnetic data with variable field direction, and its stabilisation at low inclinations. *Exploration Geophysics*. 31 (1-2):78-83.
- TAVARES, P. 1998. *Identificação de áreas potencialmente favoráveis à mineralização aurífera, a partir de dados estruturais e aerogeofísicos aplicados a terrenos do tipo "Greenstone Belt": o caso da folha Caeté, QF, MG.* Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG. 209p.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIF, R. E.; KEYS, D. A. 1990. *Applied Geophysics.* Cambridge University Press, Cambridge, 2ª ed. 860 p.
- TEXEIRA, W.; CARNEIRO, M.A.; NOCE, C.M.; MACHADO, N.; SATO, K. & TAYLOR, P.N. 1996. Pb, Sr and Nd isotope constrains on the Archaean evolution of gneissic-granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 78, 151-164.
- THOMPSON, D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47:31-37.
- TOLEDO, C.L.B. 1997. *Controle estrutural da mineralização aurífera na mina de Cuiabá, setor noroeste do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG.* Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 166p.
- VALQUIER, V.; STEENLAND, N. C.; HENDERSON, R. G. & ZEITZ, 1951. Interpretation on aeromagnetic maps. *Geological Society of America Memoir*, 47.

- VIAL, D.S.; FERREIRA JR., M.G.; FERRARI, P.G. 1987. A lapa seca de Morro Velho: metavulcanitos alterados hidrotermalmente. SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 4, Belo Horizonte, *Anais*, 7:369-390.
- VIEIRA F.W.R. 1991. Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil. In: LADEIRA; E.A. (ed). *Gold'91 Proceedings*. Rotterdam. A.A. Balkema,. 319-325.
- VIEIRA, F. W. R. 1988. Processos epigenéticos de formação dos depósitos auríferos e zonas de alteração hidrotermal do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Congr.Bras.Geol, 35, Belém, 1988. *Anais...Belém*, SBG, v.1, p.76-87.
- VIEIRA, F.W.R. & OLIVEIRA, G.A.I. 1988. Geologia do Distrito Aurífero de Nova Lima, Minas Gerais. IN: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C.E.S. (coord.). *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília, DNPM/CVRD. Vol.3, p.377-391.
- VIEIRA, M.A. 1997. Caracterização geológico-geofísica das mineralizações auríferas do *Greenstone Belt* Rio das Velhas. In: Congr. Int. Soc. Bras. Geof., 5, São Paulo, *Anais*, 2:615-618.
- WALLEUW, N.C. 2000. HEM data processing – a practical overview. *Exploration Geophysics*, 31:04, 584-594.
- WANG, X. & HANSEN, R.O. 1990. Inversion for magnetic anomalies of arbitrary three-dimensional bodies. *Geophysics*, 55, 1321-1326.
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; GRAIG, M. A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17 (2): 201-216.