



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Pós-Graduação em Geociências
Área de Metalogênese

ALFREDO ROSSETTO NUNES

Análise de Dados Geológicos, Geofísicos e de Sensoriamento Remoto para Geração de Modelos Prospectivos para a Região de Serra Leste, Carajás (PA).

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências – Área de Metalogênese.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Co-orientadora: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Este exemplar corresponde
redação final da tese defendida
por Alfredo Rossetto Nunes
e aprovada pela Comissão Julgadora
em 31/10/2002
Carlos Roberto de Souza Filho
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

Julho - 2002

i

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

200306198

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IG - UNICAMP

N922a Nunes, Alfredo Rossetto
Análise de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto para geração de modelos prospectivos para a região de Serra Leste, Carajás (PA) / Alfredo Rossetto Nunes.- Campinas,SP.: [s.n.], 2002.

Orientadores: Carlos Roberto de Souza Filho, Adalene Moreira Silva
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Geologia – Métodos estatísticos. 2. Geofísica – Métodos estatísticos. 3. Sensoriamento Remoto – Carajás, Serra do (PA). 4. Processamento de Imagens – Técnicas digitais – Sensoriamento Remoto. I. Souza Filho, Carlos Roberto de. II. Silva, Adalene Moreira. III Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências IV. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

AUTOR: ALFREDO ROSSETTO NUNES

Análise de Dados Geológicos, Geofísicos e de Sensoriamento Remoto para
Geração de Modelos Prospectivos para a Região de Serra Leste, Carajás (PA).

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho
CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Aprovada em: 31/10/02

PRESIDENTE: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho
Prof. Dr. Augusto Cesar Bittencourt Pires
Prof. Dr. Alfonso Schrank

Carlos RS Filho - Presidente
Augusto Cesar Bittencourt Pires
Alfonso Schrank

Campinas, 31 de outubro de 2002



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

Análise de Dados Geológicos, Geofísicos e de Sensoriamento Remoto para Geração de Modelos Prospectivos para a Região de Serra Leste, Carajás (PA)

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Alfredo Rossetto Nunes

A região de Serra Leste, Carajás (PA), compreende diversos contextos geológicos aos quais uma grande variedade de depósitos e ocorrências minerais encontram-se relacionados.

Dado o grande potencial prospectivo da região, a Companhia Vale do Rio Doce levantou um considerável acervo de dados sobre a região de Serra Leste, incluindo aqueles derivados de campanhas de mapeamento geológico, levantamentos geofísicos aéreos de alta resolução e imageamento por sensores remotos passivo (multiespectral) e ativo (RADAR).

O objetivo deste trabalho foi o de agregar subsídios para o estabelecimento de um modelo prospectivo regional para mineralizações de platinóides, a partir do processamento digital, integração e análise dos dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto. Para tal, foram utilizados o mapa geológico do bloco Serra Leste, os dados de levantamentos geofísicos aéreos (magnetometria, gamaespectrometria e eletromagnético no domínio do tempo), imagens do Enhanced Thematic Mapper Plus (Landsat 7), incluindo a banda pancromática com 15 metros de resolução espacial, e do RADARSAT no modo Fine, com resolução espacial de 8 metros.

A análise dos dados geológicos e geofísicos indicou uma boa correspondência das áreas de afloramento dos complexos máficos e ultramáficos com os valores baixos do canal do tório na gamaespectrometria. As unidades ultramáficas, principais hospedeiras da mineralização de EGP, são muito bem representadas pelo sinal analítico do campo magnético anômalo e pelas anomalias de condutância aparente do sistema GEOTEM. As imagens do ETM Plus (Landsat 7) processadas a partir da técnica Feature Oriented Principal Component Selection (FPCS) adaptada, possibilitou o realce das áreas ricas em minerais dos grupos das hidroxilas e em óxido de ferro, gerados a partir do intemperismo de rochas ultramáficas.

A análise espacial integrada dos produtos do processamento digital dos dados, usando como modelo o depósito de EGP do Luanga, permitiu a elaboração de um modelo prospectivo, que sugere áreas favoráveis para a prospecção de EGP na região de Serra Leste.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Development of Prospective Models through Geological,
Geophysical and Remote Sensing Data Analysis, in the Serra Leste Region, Carajás
(PA)**

ABSTRACT

Masters Thesis

Alfredo Rossetto Nunes

The Serra Leste region, located in the northeast portion of the Carajás Mineral Province (State of Pará, Brazil), hosts several mineral deposits and mineralisations that are related to different geological settings. The Companhia Vale do Rio Doce holds the majority of the property claims in the region and motivated by its prospective potential, the company has built a vast data set, including geologic maps at various scales, high resolution airborne geophysical data and passive (multispectral) and active (radar) remote sensing imagery.

The aim of the present work is to integrate these information, via digital data processing and analysis, in order to create a regional prospective model for PGE mineralisations in Carajás. The data set comprises a regional geological map, airborne geophysics (magnetometry, radiometry and time domain electromagnetics), Landsat 7/Enhanced Thematic Mapper Plus (including the 15m resolution panchromatic band) and RADARSAT (8m resolution fine path) imagery.

Geological and geophysics data analysis indicate a good correspondence between areas with mafic-ultramafic rocks and low values in gama spectrometry, particularly in the thorium channel. The ultramafic units of the complexes, the main host rock of the mineralisation, are soundly mapped by the analytic signal from the residual magnetic field and by the apparent conductance anomalies yielded through the GEOTEM system. The ETM Plus images processed by an adapted algorithm of the *Feature Oriented Principal Component Selection* (FPCS) technique, highlighted the hydroxyl minerals, generated through weathering of ultramafic rocks, and iron oxide-rich areas.

The combination of the products of digital processing and data analysis, with updated geological data of the Serra Leste region and the Luanga deposit, supported the assembly of a regional prospective model for PGE and allowed the selection of new targets within the studied area.

Aos meus pais,
às minhas irmãs
e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Carlos Roberto de Souza Filho, pela orientação, pelo acompanhamento, pelo incentivo e principalmente pela paciência.

À Companhia Vale do Rio Doce, nas pessoas de Paulo Sérgio Ribeiro Machado e José Luzimar do Rego, pelo suporte financeiro e pela disponibilidade de tempo, que possibilitaram a realização deste trabalho. Ainda gostaria de agradecer à CVRD pelo fornecimento das imagens dos sensores remotos.

À Docegeo, nas pessoas de Armando Álvares de Campo Cordeiro e Célio Ferreira Barreira, pela disponibilização dos dados geológicos e geofísicos, que possibilitaram a realização deste trabalho e pela excelente oportunidade de trabalhar na região de Serra Leste.

À minha co-orientadora Dra. Adalene Moreira Silva, pela orientação nos trabalhos de processamento digital e interpretação dos dados aerogeofísicos, pelo apoio e pela amizade durante essa jornada.

Aos professores da UnB Dr. Augusto César B. Pires e Dr. Roberto Alexandre V. de Moraes pela oportunidade da iniciação em magnetometria e gamaespectrometria.

A Carlos Henrique Cravo Costa, pelo apoio incondicional, pelo interesse declarado, pelas longas discussões sobre o tema, pelo fornecimento de dados e acima de tudo pela oportunidade de participar da equipe do Projeto Platina, composta, além deste por: Paulo E. Amorim Lima, Fernando B. Tallarico e Luiz Barroso Magno Jr., a quem também gostaria de externar a satisfação em participar da equipe e do desafio da prospecção de mineralizações de elementos do grupo da platina nos complexos máfico-ultramáficos da região de Serra Leste.

Ao professor Dr. Roberto Xavier pelo incentivo a enfrentar este desafio. Aos professores do IG-Unicamp, nas pessoas de Bernardino Figueiredo, Elson Paiva, Alfonso Schrank, Ardemírio Barros, Álvaro Crósta, Asit Choudouri, Jacinta Einzweiler, entre outros, por proporcionarem uma carga adicional à minha bagagem profissional.

Ao colega Fernando Tallarico pelo apoio na largada e na reta final deste percurso.

Aos funcionários e colegas do IG – UNICAMP: Valdirene Pinotti, Carlos Tápia, Rodrigo Bastos, Alessandro Silva, Rigoberto, Suzana, Heitor Maia, Márcio Ferrari, Carrera, Irian, Fábio, Guilherme, entre outros tantos, pelo apoio, companheirismo e amizade durante os períodos que estive em Campinas.

Aos colegas do Laboratório de Geofísica Aplicada da UnB, Alexandre Amorim e Marcelo Leão, pela ajuda com *software* e pela amizade.

Em especial, à Cristina, Rebeca e Débora, pelo amor, carinho, apoio incondicional e incentivo, para que esta dissertação se tornasse uma realidade.

SUMÁRIO

I – Introdução

1 – Introdução.....	1
---------------------	---

II – Contexto Geológico, Geotectônico e Metalogenético da Região de Serra Leste – Carajás (PA)

2.1- Contexto Regional.....	6
2.2 - Geologia da Área de Serra Leste.....	6
2.2.1-Complexo Xingu.....	7
2.2.2 - Grupo Grão Pará.....	11
2.2.3 - Grupo Rio Novo.....	11
2.2.4 - Grupo Rio Fresco.....	12
2.2.5 - Rochas intrusivas.....	13
2.2.5.1 - Granitos Arqueanos.....	14
2.2.5.2 – Granitos Paleoproterozóicos.....	14
2.2.5.3 – Corpos Máfico-ultramáficos - Complexo Luanga.....	15
2.2.5.4 - Corpos Gabróicos.....	16
2.3 - Ambiente Geotectônico.....	16
2.4 - Contexto Estrutural.....	18
2.5 – Metalogênese.....	22

III - Processamento dos Dados Aeromagnéticos, Gamaespectrométricos e Eletromagnéticos da Área de Serra Leste, Serra dos Carajás, Pará.

3.1 – Introdução.....	29
3.2 – Materiais.....	29
3.3 – Métodos.....	33
3.3.1 - O pré-processamento e o processamento dos dados de Serra Leste.....	33
3.3.2 - O realce dos dados aeromagnéticos.....	42
3.3.2.1 - Espectro Radial de Potência.....	38
3.3.2.2 - Continuação ascendente do campo magnético anômalo.....	45
3.3.2.3 - Primeira derivada vertical do campo magnético anômalo.....	45
3.3.2.4 - Derivadas horizontais em X, Y e gradiente horizontal total (GH).....	46
3.3.2.5 - Amplitude do sinal analítico de ordem zero (onde $n=0$).....	50
3.3.2.6 - A Fase do Sinal Analítico.....	53
3.3.2.7 - Deconvolução de Euler.....	56
3.3.3 - Realce dos Dados Gamaespectrométricos.....	62
3.3.4 - Apresentação dos Dados Eletromagnéticos no Domínio do Tempo.....	71

IV- Processamento e Interpretação dos Dados dos Sensores LANDSAT – 7/Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) e RADARSAT

4.1 – Introdução.....	81
4.2 – Materiais.....	81
4.2.1 - Dados do Landsat-7/Enhanced Thematic Mapper Plus.....	81
4.2.2 - Dados do RADARSAT.....	83
4.3 - Processamento Digital dos Dados de Sensoriamento Remoto.....	84
4.3.1. Dados do Landsat-7/Enhanced Thematic Mapper Plus.....	84
4.3.1.1 - Pré-processamento.....	85
4.3.1.2 - Processamento.....	86

4.3.2 - Dados do RADARSAT.....	97
4.3.2.1 - Correção Geométrica.....	98
4.3.2.2 - Filtragens e Realces.....	99
4.3.2.3 - Produtos Integrados.....	102

**V- Interpretação e Integração dos Dados Aerogeofísicos e de Sensoriamento Remoto,
para a Geração de Modelos Prospectivos para EGP na Região de Serra Leste**

5.1. Introdução.....	103
5.2 - Interpretação dos dados aerogeofísicos.....	103
5.2.1 – Magnetometria.....	103
5.2.2 – Gamaespectrometria.....	106
5.2.3 - Eletromagnetismo no Domínio do Tempo.....	108
5.3 - Interpretação dos Dados de Imageamento Passivo (Landsat- 7/ETM+) e Ativo (RADARSAT).....	109
5.4 - Análise e Interpretação dos Produtos Integrados da Imagem RADARSAT com Aeromagnéticos e Aerogamaespectrométricos.....	110
5.5 – Assinatura Geofísica e Espectral dos Metalotectos Associados aos Depósitos de EGP em Serra Leste.....	111
5.6 – Geração do Modelo Prospectivo para Elementos do Grupo da Platina na Região de Serra Leste.....	116
VI – Conclusões.....	120

TABELAS

Tabela 2.1 - Concentração de PGE (ppb) e Au (ppm) no cromititos do complexo Luanga.

Tabela 4.1 – Características das bandas espectrais do Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). O espectro compreendido da Banda 6 é, na realidade, sensoriado com uma banda de alto ganho (banda 6.1) e uma banda de baixo ganho (banda 6.2).

Tabela 5.1 – Características principais dos depósitos minerais de Serra Leste

Tabela 5.2 – Sumário das assinaturas mapeadas para os depósitos e mineralizações de EGP e Cu-Au-U-ETR-Fe, da região de Serra Leste.

FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa de localização

Figura 1.2- Imagem do ETM+ (Landsat 7), mostrando a localização dos principais depósitos minerais da Província Mineral de Carajás e a localização da área de Serra Leste.

Figura 1.3 - Macro fluxograma do processo de utilização de sensoriamento remoto na prospecção de metais preciosos.

Figura 2.1 - Mapa Geológico do Cinturão de Cisalhamento Itacaiunas, segundo Docegeo (1988).

Figura 2.2 – Coluna lito-estratigráfica do CCI proposta por Docegeo (1988), com adaptações de Araújo & Maia (1991), Macambira & Lafont (1995), Pinheiro & Holdsworth (1997) e Huhn et al. (1999).

Figura 2.3 - Mapa Geológico da Área Serra Leste.

Figura 2.4 – Sistema Transcorrente Cinzento segundo Siqueira (1996).

Figura 2.5 – Evolução estrutural da região de Carajás segundo Pinheiro e Holdsworth (1997).

Figura 3.1- Mapa de linhas de vôo do aerolevante gamaespectrométrico e eletromagnético no domínio da frequência (GEOMAG, 1993). As linhas de vôo estão espaçadas de 250 m e orientadas NS, enquanto as de controle são espaçadas de 5000 m e orientadas perpendicularmente às anteriores. O detalhe abaixo a direita mostra a exclusão de leituras devido problemas de posicionamento da aeronave (cruzamento de linhas).

Figura 3.2 - Mapa das linhas de vôo do aerolevante magnetométrico e eletromagnético no domínio da tempo (GEOTERREX-DIGHEM, 1999). As linhas de vôo de direção norte-sul estão espaçadas de 250 m, enquanto as de controle, leste-oeste, estão espaçadas de 6000 m. A figura exemplifica dois testes efetuados no pré-processamento dos dados para a avaliação e eliminação de ruídos, denominados de diferença quarta e parâmetro P (Blum, 1999). O perfil ilustra a consistência dos dados e ausência de problemas como ruído e posicionamento.

Figura 3.3 - Arranjo do sistema eletromagnético GEOTEM, no domínio do tempo. O sistema GEOTEM possui um receptor com três bobinas, duas horizontais, nas direções X e Y e uma vertical na direção Z, um transmissor com bobina de eixo vertical. A separação horizontal entre o transmissor e o receptor é de 125 metros, enquanto que a vertical entre o transmissor e receptor é 50 metros (GEOTerrex Transient ElectroMagnetic system, 1998).

Figura 3.4 - Fluxograma mostrando o método utilizado no processamento dos dados magnetométricos.

Figura 3.5 – a) Imagem do campo magnético anômalo interpolada pelo método da curvatura mínima, iluminada de leste para oeste. b) Imagem do campo magnético anômalo interpolada pelo método bi-direcional, iluminada de leste para oeste. Ambas as imagens mostram artefatos N-S, provenientes de imperfeições após o nivelamento das malhas de amostragem.

Figura 3.6 - Imagem do campo magnético anômalo, micronivelada e iluminada de leste para oeste. Alguns ruídos remanescentes, principalmente, nas áreas de baixa intensidade magnética, foram removidos através da aplicação de um filtro de média móvel, do tipo Hanning, com janela de 3x3. Observam-se as descontinuidades referentes: ao lineamento cinzento de direção WNW, às

estruturas de segunda ordem do lineamento cinzento, ao acamamento ígneo nos complexos máfico ultramáficos Luanga, Luanga Sul, Órion e Afrodite e às formações ferríferas.

Figura 3.7 – Espectro de potência de energia do campo magnético anômalo, indicando profundidade de 1km para as fontes profundas e 400 metros para as fontes intermediárias, segundo Spector e Grant (1970).

Figura 3.8 - Continuação ascendente do campo magnético anômalo para uma altura de 187 metros, ou seja, três vezes o espaçamento das linhas de vôo, conforme sugerido por Silva (1999). As unidades importantes da área são correlacionadas às zonas de alta frequência, que quando analisadas separadamente das fontes mais rasas, mostram a mesma expressão.

Figura 3.9 - Imagem da derivada vertical de primeira ordem, do campo magnético anômalo, iluminada de E para W, mostrando uma série de lineamentos orientados NE associados aos complexos máfico ultramáficos e feições N-S relacionadas aos diques gabróicos neoproterozóicos.

Figura 3.10 - Imagens em falsa cor das derivadas horizontais nas direções X e Y. Notar que essas imagens realçam as bordas, principalmente das feições NE, relacionadas às unidades ultramáficas dos complexos máfico ultramáficos. Mostram feições sutis de direção aproximada N-S, relacionadas aos diques de gabro com magnetita do Neoproterozóico. O lineamento da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (ZCTC) também pode ser observado.

Figura 3.11 - Imagem falsa cor do gradiente horizontal, iluminada de E para W, mostrando um gradiente lateral para as anomalias magnéticas, com ampliação nas bordas. O lineamento cinzento é bem representado, indicando um arrasto sinistral das unidades geofísicas e litoestratigráficas que representam os complexos Luanga e Luanga Sul, ao longodeste lineamento, ocorrido na terceira fase de deformação e que foi precedido por um movimento dextral na segunda fase de deformação, indicado pela geometria desses complexos.

Figura 3.12 - A composição do sinal analítico, a partir da combinação das derivadas horizontais e vertical, gera a amplitude do sinal analítico. Os valores máximos desse sinal podem ser usados para determinar as bordas do corpo e estimar suas profundidades (Roest et al. 1992; Hsu et al. 1996).

Figura 3.13 - Imagem falsa cor da amplitude do sinal analítico de ordem zero, iluminada de Leste para Oeste, mostrando: a) anomalias NE correlacionadas às unidades ultramáficas dos complexos máfico ultramáficos arqueanos (Luanga, Luanga Sul, Pégasus, Luanga Norte e Formiga); b) Anomalias com formas predominantemente circulares sob as formações ferríferas do depósito de Ferro Serra Leste no centro Norte da área; c) feições discretas orientadas NS a NNW relacionadas à resposta magnética dos diques de gabro com magnetita do Neoproterozóico, destacadas em linhas azuis; d) um conjunto de anomalias de alta frequência e alta amplitude do sinal analítico, na porção central da área correspondente às áreas de afloramento dos complexos máfico ultramáficos Órion e Afrodite. As linhas em branco representam os eixos das anomalias da fase do sinal analítico.

Figura 3.14 - Imagem em tons de cinza, da fase do sinal analítico, ressaltando os eixos do sistema de falhas transcorrentes de direção aproximada E-W, com caráter anastomosado. A Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento (ZCTC), aparece como lineamento WNW, caracterizado pelo truncamento e o arrasto dos eixos ENE.

Figura 3.15 – Mapa de Soluções de Euler, índice estrutural zero ($dZ = 0 - 5\%$), mostrando alinhamento preferencial das soluções segundo a direção NE, na área de ocorrência dos complexos máfico ultramáficos, com profundidades variando de 500 a 400 m. Na área dos depósitos de ferro de Serra Leste as soluções de Euler indicam profundidades maiores que 600 metros, para a fonte das anomalias magnéticas.

Figura 3.16 – Mapa de soluções de Euler, índice estrutural 0,5 ($dZ = 0 a 5\%$), mostrando o alinhamento segundo a direção NE preferencial das soluções, na área dos complexos máfico ultramáficos, com profundidades variando de 100 a 300 metros. Na porção centro Norte da área ocorre um conjunto de soluções com formato circular, com profundidades superiores a 600 metros, que corresponde à ocorrência de magnetita associada à formação ferrífera.

Figura 3.17 – Mapa de soluções de Euler, índice estrutural 1 ($dZ = 0 - 5\%$), mostrando alinhamento preferencial das soluções, segundo a direção NE, com soluções apresentadas em

conjuntos mais espessos, mostrando um gradiente lateral de profundidade, que varia de 35 a 400 metros.

Figura 3.18 – Mapa de soluções de Euler com índice estrutural 2 ($dZ = 0$ a 5%), que modela corpos com formas cilíndricas, mostra anomalias com profundidades em torno de 600 metros nos depósitos de ferro de Serra Leste, na porção centro Norte da área.

Figura 3.19 – Mapa de soluções de Euler com índice estrutural 3 ($dZ = 0$ a 5%), que modela corpos com formas esféricas indica fontes com profundidades superiores a 600 metros sob os depósitos de ferro de Serra Leste e a Sul do garimpo do Formiga, onde ocorrem formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

Figura 3.20 - Método utilizado no processamento dos dados gamaespectrométricos.

Figura 3.21 - As imagens coloridas dos canais da gamaespectrometria, sobrepostas ao modelo digital de elevação, mostram que os domínios gamaespectrométricos estão relacionados com as unidades geológicas e não apresentam influência determinante do relevo.

Figura 3.22 – Imagem do canal da contagem total, micronivelada, pseudo iluminada de leste para oeste. Alguns ruídos remanescentes, foram removidos através da aplicação de um filtro de média móvel do tipo Hanning, com janela de 3 x 3. Observa-se a relação dos valores baixos com os complexos máfico ultramáficos: a) Luanga, b) Luanga Sul, c) Órion, d) Afrodite, e) formiga, f) Luanga Norte, g) Pégasus e h) Centáuro. Os valores altos correspondem a unidades geológicas de natureza diversa, a saber: Complexo Xingu (AGRni e AgrGntton), Granito Estrela (AgrE), sericita quartzitos do Grupo Rio Novo (ARNq) e Granito Cigano (EoPgrC). O lineamento cinzento (ZCTC) e zonas de cisalhamento que compõem o splay divergente de Serra Pelada, são representados nesta imagem pelo arrasto das unidades geológicas e gamaespectrométricas.

Figura 3.23 – Imagem do canal do potássio, micronivelada, pseudoiluminada de leste para oeste. Alguns ruídos remanescentes, foram removidos com a aplicação de um filtro de média móvel tipo Hanning, com janela 3 x 3. Os valores altos do canal do potássio, estão relacionados com metassedimentos do grupo Rio Novo (quartzitos – ARNq e metapelitos ARNm), que ocorrem intercalados na porção noroeste da área, aos granitos das suítes Estrela (AgrE) e Cigano (EoPgrC) e com os gnaisses tonalíticos do Complexo Xingu.

Figura 3.24 – Imagem do canal do urânio, micronivelada, pseudo iluminada de leste para oeste. Os ruídos remanescentes foram removidos com a aplicação de um filtro de média móvel tipo Hanning, com janela 3 x 3. Os valores mais altos do canal do urânio ocorrem nas áreas de afloramento dos granitos da suíte Estrela (AgrE) e do granito Cigano (EoPgrC) e nas porções SW e SE da área, relacionados à resposta dos granitos e gnaisses do Complexo Xingu. Valores intermediários representam a resposta dos quartzitos e metapelitos do Grupo Rio Novo (ARNq e ARNm) e das coberturas lateríticas do depósito de ferro Serra Leste (TQDL). Os complexos máfico ultramáficos a) Luanga, b) Luanga Sul, c) Órion, d) Afrodite, e) Formiga, f) Luanga Norte, g) Pégasus e h) Centáuro, são representados por valores baixos. A porção oriental do lineamento Cinzento é destacada nesta imagem.

Figura 3.25 – Imagem do canal do tório, micronivelada, pseudo iluminada de leste para oeste. Os ruídos remanescentes foram removidos com a aplicação de um filtro de média móvel do tipo Hanning, com janela de 3x3. Os valores baixos mostram relação direta com as áreas de afloramento dos complexos máfico ultramáficos: a) Luanga, b) Luanga Sul, c) Órion, d) Afrodite, e) Formiga, f) Luanga Norte, g) Pégasus e h) Centáuro. Os valores altos relacionam-se à resposta das unidades geológicas de natureza diversa: os granitos Cigano (EoPgrC) e Estrela (AgrE), os granitos e gnaisses do Complexo Xingu (AgrGni e AgrGntton), os quartzitos (ARNq) e meta pelitos e meta siltitos (ARNm) do Grupo Rio Novo e as Coberturas lateríticas no ferro Serra Leste (TQDL). A Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (ACTC) é delineada nesta imagem.

Figura 3.26 – Diagrama mostrando a variação pela média do conteúdo de K, U e Th, para alguns tipos de rochas, com o acréscimo do SiO₂ na composição modal (Blum, 1999).

Figura 3.27 – Imagem ternária dos canais K, U e Th da gamaespectrometria, pelo sistema de cores RGB, com K no vermelho, Th no Verde e U no azul. A percentagem de cada cor primária na

imagem final indica a contribuição de cada elemento na cor da imagem. As áreas com cores claras próximo ao branco indicam valores altos da radiação gama, relacionados com as rochas graníticas do Complexo Xingu (AgrGni e AgrGntton), das suítes Estrela (AgrE) e Ciganos (EoPgrC) e aos meta sedimentos do Grupo Rio Novo (ARNq e ARNm). As áreas com cores escuras representam valores baixos da radiação gama e correspondem a áreas de afloramento das rochas máficas e ultramáficas, representadas pelo contorno em amarelo. Os contornos em vermelho indicam as áreas onde houve enriquecimento em potássio e os contornos azuis indicam as áreas onde houve enriquecimento em urânio.

Figura 3.28 – Imagem colorida da razão U/Th, mostrando uma boa correspondência dos valores altos dessa razão, com as áreas de afloramento dos complexos máfico ultramáficos acamadados. O lineamento principal da Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento (ZCTC), pode ser observado nesta imagem.

Figura 3.29 - Nomograma mostrando a geometria assumida para o sistema GEOTEM, para o caso de um condutor com comprimento de 600 m e 300 m de espessura, com condutância igual a 20 Siemens, utilizado para o cálculo da condutância aparente.

Figura 3.30 – Levantamento eletromagnético (GEOTEM). Imagem do canal Z 18 micronivelada e iluminada de Leste para Oeste, mostrando a localização dos principais depósitos da área e das linhas de alta tensão (em amarelo), onde observa-se que a influência das linhas de força foi filtrada, mostrando uma interferência reduzida no sinal do campo secundário. As principais áreas condutivas estão relacionadas com os sedimento da Serra do Sereno, com os complexos máfico ultramáficos Luanga, Formiga e Luanga Sul e com a cobertura condutiva na área de Serra Pelada.

Figura 3.31 – Levantamento eletromagnético (GEOTEM). Imagem colorida da Condutância Aparente, com a localização das linhas de transmissão de energia elétrica e dos principais depósitos da região de Serra Leste, mostrando a ocorrência de domínios condutivos coincidentes com as áreas de afloramento de rochas máficas e ultramáficas dos complexos Luanga, Luanga Sul, Luanga Norte e Formiga. As anomalias que ocorrem na porção central da área e entre o Formiga e Serra Pelada são atribuídas à cobertura condutiva espessa (manto de intemperismo).

Figura 3.32 - Mapa da condutância aparente mostrando o perfil A-B, que compara a variação da condutância aparente calculada com o campo magnético anômalo. Destaca-se a correlação da condutância aparente com as rochas ultramáficas magnéticas dos complexos Luanga e Luanga Sul.

Figura 3.33 – Levantamento eletromagnético (GEOTEM). Mapa de soluções do “Conductivity Thickness Product” (CTP) mostrando as linhas de transmissão de energia elétrica em vermelho e a localização dos principais depósitos minerais que ocorrem na área. Os principais conjuntos de soluções estão localizados nos complexos máfico ultramáficos Luanga, Formiga e Luanga Sul, nos meta sedimentos da Serra do Sereno e na área do depósito de Serra Pelada.

Figura 4.1-Prancha de imagens, mostrando os produtos dos realces aplicados à imagem do ETM+ (a =composição colorida 453, b =composição colorida 431, c = composição colorida 147 e d = razão 5/4), realçando as áreas com vegetação, as formações ferríferas, carapaças lateríticas e zonas de alteração hidrotermal relacionadas às principais estruturas.

Figura 4.2 - Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas ultramáficas na região do espectro coberta pela banda ETM+_7 (2.09-2.35µm).

Figura 4.3 - Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas máficas na região do espectro coberta pela banda ETM+_7 (2.09-2.35µm).

Figura 4.4 - Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas ultramáficas na região do espectro coberta pela banda ETM+_6 (10.40 - 12.50µm). Dados espectrais extraídos da biblioteca da Johns Hopkins University – as medidas foram realizadas com um espectrofotômetro Nicolet FTIR (cf. <http://asterweb.jpl.nasa.gov>).

Figura 4.5 - Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas máficas na região do espectro coberta pela banda ETM+_6 (10.40 - 12.50µm). Dados espectrais extraídos da biblioteca da Johns Hopkins University – as medidas foram realizadas com um espectrofotômetro Nicolet FTIR (cf. <http://asterweb.jpl.nasa.gov>).

Figura 4.6 - Composição colorida falsa-cor: bandas 357 (RGB). Os polígonos em branco na imagem correspondem a áreas onde afloram rochas máficas e ultramáficas, principais metalotectos associados as mineralizações de EGP. Note que os tons avermelhados na imagem estão predominantemente inscritos nesses polígonos e são devidos à reflexão de radiação por essas rochas na região do vermelho do espectro, fenômeno detectado pela banda ETM+_3. A banda 7 contribui na assinatura espectral das formações ferríferas e das coberturas lateríticas (tons azul-arroxeados na porção centro-noroeste da imagem).

Figura 4.7 - Composição colorida falsa-cor: bandas 356 (RGB). Da mesma forma que a banda ETM+_7, a banda ETM+_6 (termal) contribui na assinatura espectral das formações ferríferas e das coberturas lateríticas (tons roxos na porção centro-noroeste da imagem).

Figura 4.8 - Composição colorida derivada da técnica FPCS adaptada com contornos das rochas máficas e ultramáficas superpostos. As áreas em tons esbranquiçados indicam superfícies ricas, simultaneamente, em minerais de hidroxila e óxidos/hidróxidos de ferro. Note que uma porcentagem significativa dos corpos máficos e ultramáficos conhecidos foram detectados, enquanto outras áreas necessitam de verificação de campo. Observe ainda que as coberturas lateríticas e as formações ferríferas aparecem diferenciadas neste produto – as lateritas são ricas em argilas + ferro (branco), enquanto as formações ferríferas são predominantemente ricas em ferro (castanho).

Figura 4.9 - IHS – Prancha com imagem integrada. a) fusão da composição colorida entre as bandas 4, 5 e 3 (RGB), com a banda pancromática do ETM+, que permitiu identificar feições do relevo relacionadas ao Splay Divergente de Serra Pelada, a terminação Leste do Cinturão de Cisalhamento Transcorrente Cinzento; b) lineamentos interpretados a partir do produto integrado.

Figura 4.10 - Etapas de processamento de imagens de radar.

Figura 4.11 - O fenômeno do “speckle”.

Figura 4.12 - Filtragem por janela.

Figura 4.13 - Imagem realçada RADARSAT, no modo Fine Resolution Path Image, com visada descendente, com ângulo de incidência F3 (41° a 44°), da região de Serra Leste, com lineamentos interpretados.

Figura 4.14 - Produtos integrados da imagem RADARSAT (Fine, descendente, F3) com imagens do levantamento geofísico aéreo de magnetometria e gamaespectrometria (a = sinal analítico, b = fase do sinal analítico, c = canal do tório e d = imagens ternária dos canais K, Th e U em R, G e B, respectivamente).

Relação de Figuras:

Figura 5.1 – Mapa geológico modificado de Veneziani e Okida (2001).

Figura 5.2 – Mapa ilustrando a criação de buffers em torno dos eixos interpretados das anomalias da amplitude e da fase do sinal analítico do campo magnético anômalo.

Figura 5.3 – Mapa de setores favoráveis para a prospecção de elementos do grupo da platina (EGP), na região de Serra Leste, Província Mineral de Carajás, PA.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1 – Introdução

A área de Serra Leste, localizada na porção leste da Província Mineral de Carajás, na região sul do Estado do Pará (Figura 1.1), vem despertando o interesse das empresas de mineração pela diversidade de bens minerais que hospeda (Figura 1.2). Atualmente, estão sendo desenvolvidos programas de pesquisa objetivando a descoberta de depósitos de ouro, Elementos do Grupo da Platina (Pt, Pd, Rh, Ru, etc.), cobre e manganês, além do aproveitamento de uma jazida de ferro e uma de calcáreo.

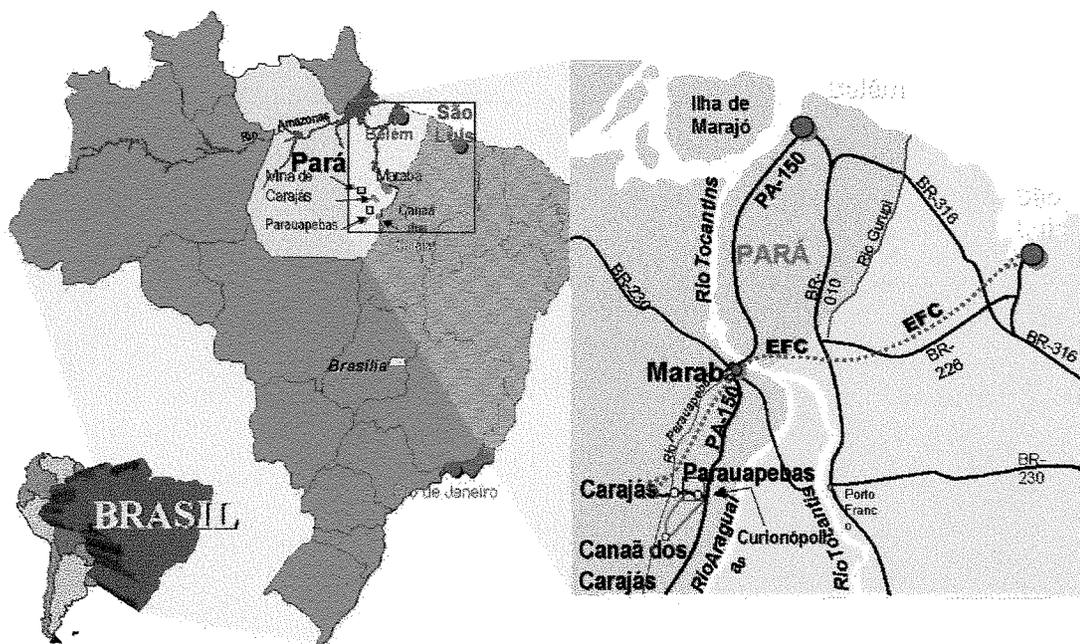


Figura 1.1. Mapa de Localização

A integração de dados geológicos é essencial em programas de exploração mineral. Essa integração torna-se imperativa em áreas intensamente investigadas através de diversas técnicas e envolvendo várias etapas de mapeamento geológico básico, levantamentos geoquímicos e geofísicos e de imageamento com sensores remotos, como é o caso da Província Mineral de Carajás. Existe um grande acervo de dados gerados sobre esta região, produzido ao longo de mais de três décadas de levantamentos.

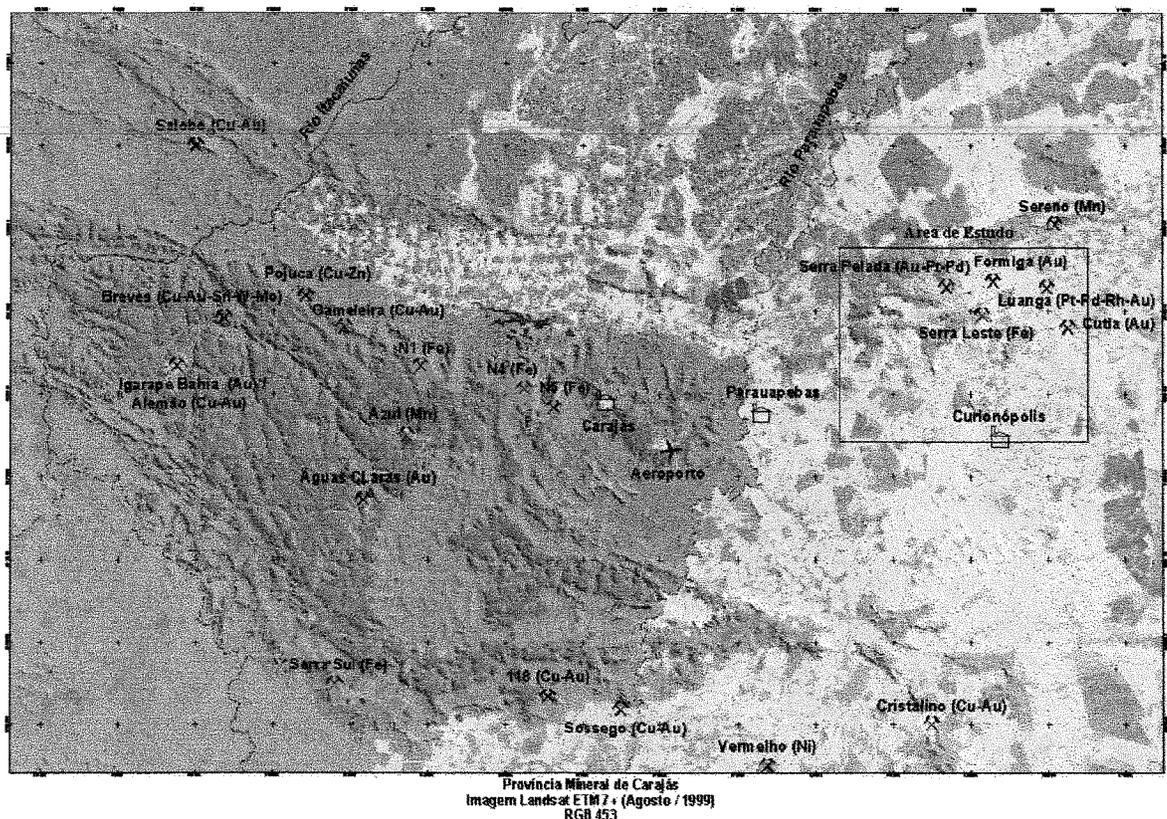


Figura 1.2- Imagem do ETM+ (Landsat 7), mostrando a localização dos principais depósitos minerais da Província Mineral de Carajás e a localização da área de Serra Leste.

Até o final da década de 80, de um modo geral, a integração de dados era feita com o uso de dados analógicos através da superposição de mapas em papel ou películas transparentes, de maneira empírica. A superposição de dados multi-temáticos era assim bastante limitada. Com a introdução e contínuo aperfeiçoamento de técnicas de processamento, integração e análise espacial e estatística

de dados, o processo de manipulação e extração de informações a partir dos mesmos tornou-se mais simples e eficaz, possibilitando o manuseio de uma grande quantidade de dados em tempo real.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) foram inicialmente desenvolvidos com objetivo de sobrepor vários níveis de informação, em formato digital, em um mesmo mapa (Bonham-Carter, 1997). A proposta de um SIG, aplicado à exploração mineral, é a de analisar espacialmente, dados topográficos, geológicos, multiespectrais, geofísicos e geoquímicos, proporcionando suporte na tomada de decisões em programas de prospecção mineral.

Este trabalho tem como objetivo a análise integrada de dados geológicos, geofísicos e de imageamento por sensores remotos, para geração de um modelo prospectivo para Elementos do Grupo da Platina, na área de Serra Leste, Carajás. Para isso foi utilizado um robusto acervo de dados, adequado a este objetivo, contendo dados de levantamentos geofísicos pelos métodos gamaespectrométrico, magnetométrico e eletromagnético no domínio do tempo (GEOTEM), mapas geoquímicos, imagens de sensores remotos, mapas geológicos, mapas topográficos e mapas de localização dos depósitos e ocorrências.

A área selecionada para o estudo tem 716 km² e é definida por um polígono limitado pelos paralelos 634.000 E e 666.000E e pelos meridianos 9.325.000 N e 9.347.400 N, na zona 22 S do sistema UTM. O acesso à área pode ser feito por via rodoviária, através da PA-275, a partir dos municípios de Parauapebas ou Marabá, no Estado do Pará (Figura 1.2).

Os direitos minerários da área são, na sua grande maioria, de propriedade da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), que forneceu o acervo de dados utilizado neste trabalho. Esta área contém uma série de ocorrências minerais (Figura 1.2), entre elas o depósito de ouro de Serra Pelada, do qual foram produzidos acima de 80 toneladas do metal, durante a atividade garimpeira.

Além desse depósito, a área de estudo hospeda ocorrências de cromo e elementos do grupo da platina (EPG) associadas às intrusões do Complexo máfico-ultramáfico do Luanga; a jazida de ferro de Serra Leste; as jazidas de manganês do Sereno e ocorrências de cobre e ouro, de menor expressão (Serra Verde).

Os depósitos de EPG têm despertado grande interesse das companhias de mineração, devido aos altos valores de mercado, em função da redução das reservas mundiais e de projeções de aumento da demanda. Assim, neste trabalho, será dada ênfase na geração de um modelo prospectivo para elementos do grupo da platina e ouro, baseado na assinatura geológica, geofísica e multiespectral do depósito de Luanga.

O fluxograma apresentado na Figura 1.3 (adaptado de Sabine, 1999) resume as etapas metodológicas que orientaram o desenvolvimento deste trabalho, descrevendo a utilização de dados de imageamento passivo e ativo e dados geofísicos para a prospecção de metais preciosos. O primeiro passo no modelo é a seleção das técnicas de sensoriamento a serem utilizadas, onde devem ser consideradas as restrições ambientais e as limitações dos métodos de coleta de dados. O segundo passo é o processamento e a interpretação dos dados; o terceiro passo envolve a integração dos dados e a elaboração do modelo prospectivo. O uso de métodos indiretos na exploração mineral pode ser dividido em dois tipos principais: i) para imageamento da superfície terrestre, de onde são extraídas as feições geomofológicas do terreno e as características espectrais, relacionadas à composição físico-química dos materiais superficiais; ii) para levantamentos geofísicos, onde são medidas as propriedades físicas da superfície e da crosta terrestre.

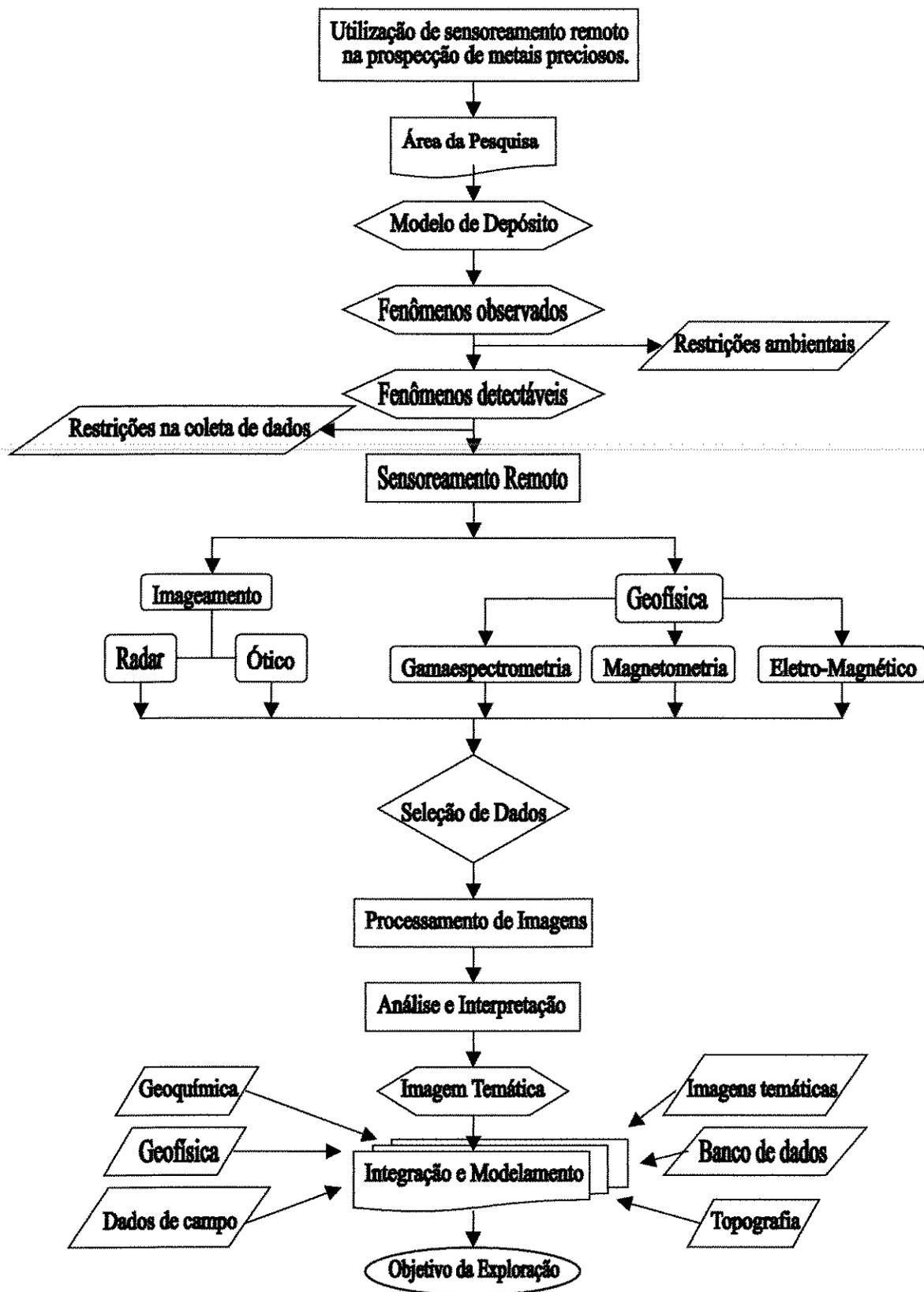


Figura 1.3 - Macro fluxograma do processo de utilização de sensoriamento remoto na prospecção de metais preciosos.

CAPÍTULO II

CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOTECTÔNICO E METALOGENÉTICO DA REGIÃO DE SERRA LESTE – CARAJÁS (PA)

2.1- Contexto Regional

A Serra dos Carajás (SC), na qual se inscreve a Província Mineral de Carajás, é a principal expressão geomorfológica do Sul do Estado do Pará. A SC compreende um segmento crustal constituído por uma porção de um núcleo *granito-greenstone* (terreno *granito-greenstone* de Rio Maria), representado a Norte por extensas faixas de rochas supracrustais do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Docegeo, 1988), que repousam sobre um embasamento denominado Complexo Xingu, limitado a Leste pela faixa Araguaia e a Sul pelo Cinturão Alto Tapajós (Figura 2.1).

O empilhamento lito-estratigráfico do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (CCI), apresentado na Tabela 2.1, é baseado na coluna proposta por Docegeo (1988), com adaptações segundo os trabalhos de Araújo et al. (1988), Macambira et al. (1990), Araújo & Maia(1991), Nogueira et al. (1995), Pinheiro & Holdsworth (1997) e Huhn et al. (1999).

2.2 - Geologia da Área de Serra Leste

O arcabouço geológico da área de Serra Leste (Figura 2.3) é composto:

- pelo Complexo Xingu (2.872 +/- 10 Ma), que representa o embasamento regional e ocorre na parte sul e sudeste da área;

- pelo Grupo Rio Novo (2.757 Ga +/- 2 Ma), que compreende um conjunto de rochas vulcano-sedimentares e ocorre na porção central da área, em contato brusco ou interdigitado com as rochas do embasamento;
- pelo Domínio Sedimentar (Docegeo, 1995), correlacionável ao Grupo Rio Fresco (2.580 a 2.500 Ma), que inclui uma faixa alongada de rochas sedimentares, de direção NE, em contato com as rochas do Grupo Rio Novo.

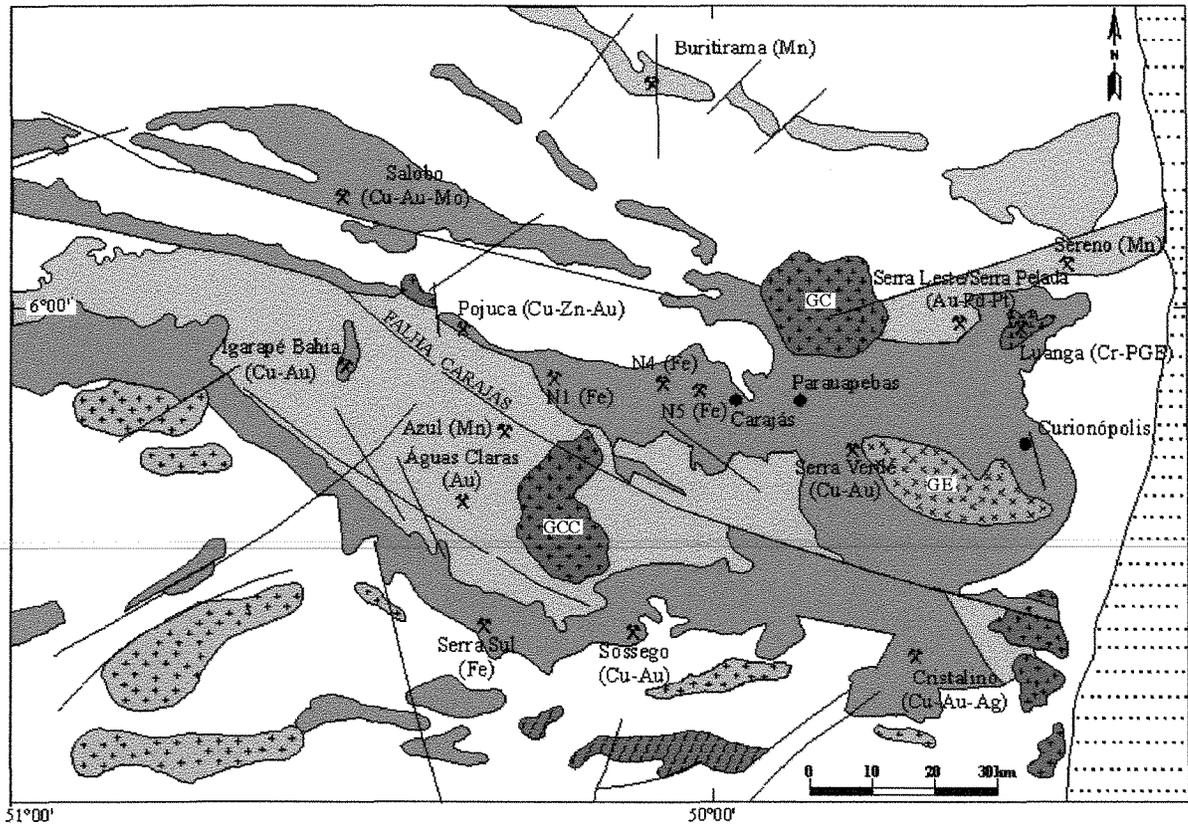
Ocorrem ainda corpos intrusivos de idades e naturezas diversas, variando de rochas ultramáficas, gabros até granitos.

2.2.1 - Complexo Xingu

O embasamento regional, denominado Complexo Xingu (Projeto Radam, 1974), é representado por rochas de composição gnáissica tonalítica a trondhjemítica, de idade superior a 2,9 Ga (Machado et al., 1988), no qual foram incluídos os terrenos infracrustais pertencentes ao Cráton Amazônico. Araújo et al. (1991) propuseram a denominação de Complexo Xingu somente para as rochas pré-cambrianas metamorfisadas em fácies anfíbolito, extraíndo desta unidade, as rochas de mais alto grau metamórfico e as retrometamorfisadas de fácies granulito. Essas rochas foram agrupadas em uma nova unidade, denominada Complexo Pium, que ocorre em janelas estruturais dentro do Complexo Xingú, onde afloram rochas granulíticas mais antigas (3050±114 Ma, Pb-Pb em rocha total, Rodrigues et al. 1992).

O complexo Xingu (op. cit.) é composto por rochas graníticas, representadas predominantemente por tonalitos e granodioritos e, subordinadamente, por monzonitos. É freqüente, neste complexo, a presença de metabasitos anfíbolitizados, que ocorrem sob a forma de mesoenclaves boudinados ou rotacionados e possivelmente representam restitos de crosta máfica primitiva. Esses enclaves encontram-se variavelmente deformados (protomilonitizados ou milonitizados) e metamorfizados na fácies anfíbolito.

Os terrenos constituídos por rochas do Complexo Xingu formam um relevo arrasado, plano, com colinas baixas, de topos subarredondados e encostas de baixa declividade. É comum



-  Faixa Araguaia (Neoproterozóico)
-  Granitos Anorogênicos do Proterozóico (ca. 1.88 Ga)
GCC: Granito Central de Carajás, GC: Granito Cigano
-  Granitos do Arqueano (ca. 2.55 Ga) GE: Granito Estrela
-  Granitos e Dioritos Arqueanos (Suite Plaqué, ca. 2.74 Ga)
-  Sequências Metasedimentares do Arqueano (Grupo Rio Fresco / Formação Águas Claras)
-  Sequências Metavulcano-Sedimentares do Arqueano (Supergrupo Itacaiunas, ca. 2.75 Ga)
-  Complexo Máfico-Ultramáfico do Arqueano (ca. 2.76 Ga)
-  Embasamento Gnáissico e Migmatítico Arqueano (Complexo Xingú, ca. 2.8 Ga)
-  Granulitos Arqueanos (Complexo Pium, ca. 3.0 Ga)
-  Contatos Geológicos
-  Falhas
-  Minas / Mineralizações
-  Cidades

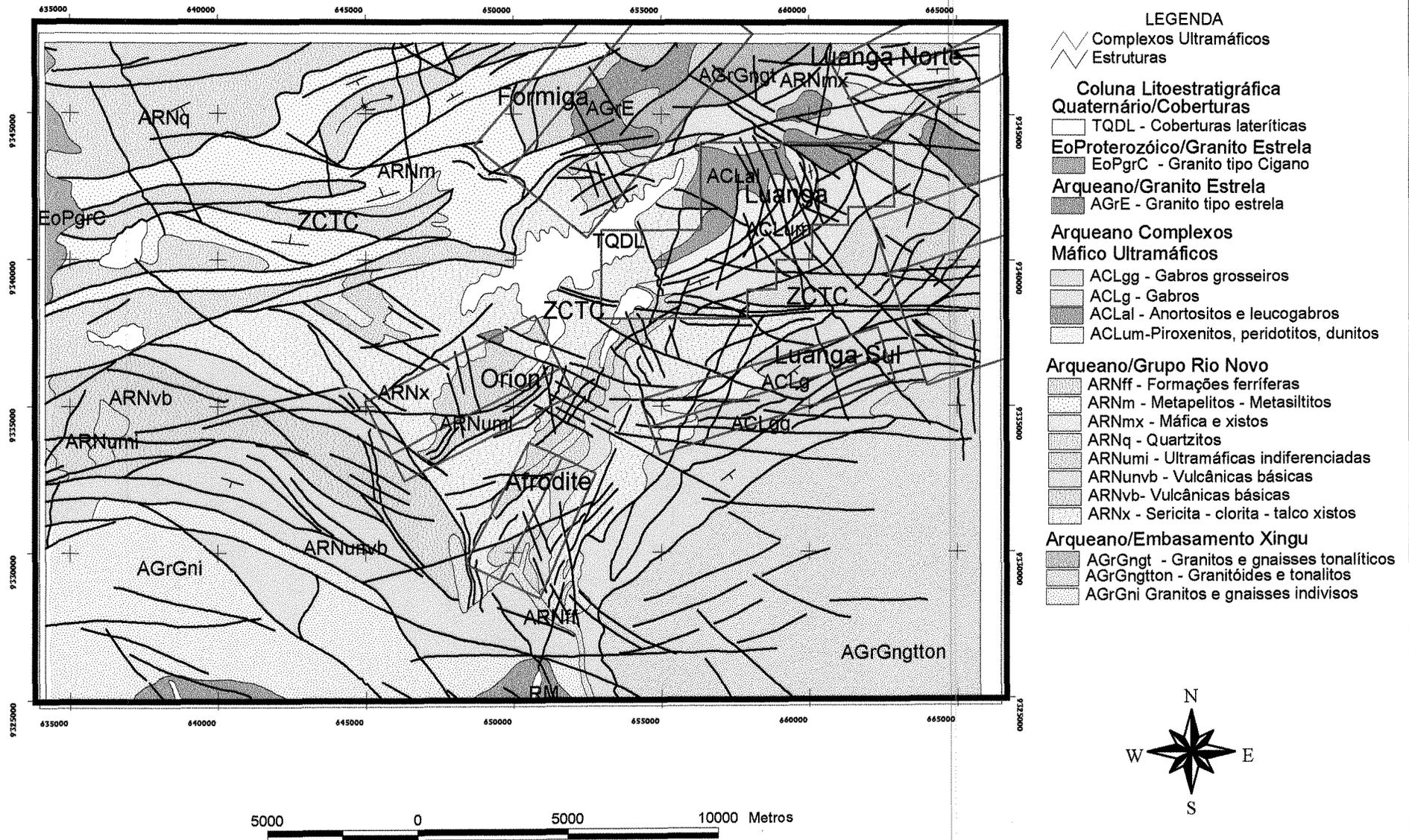
Figura 2.1 - Mapa Geológico do Cinturão de Cisalhamento Itacaiunas após Araújo e Maia (1991), Barros e Barbey (1998), Docege (1988)

a ocorrência de morros isolados e serras alinhadas segundo a direção E-W, relacionadas a mudanças litológicas e feições estruturais.

Éon	Era	Idades (Ma)	Unidades Litoestratigráficas
Proterozóico	Neo	550	Diques e sills máficos
	Meso		Fm. Gorotire
	Paleo	1880	Suíte Granítica Anorogênica
			Metagabro Sta. Inês
			Metaultramáfica (Vermelho, Puma e Onça)
	1900?		
Arqueano	Neo	2525	Complexo Granítico Estrela
		2570	
		2645	
			Fm. Águas Claras
		2680	Suíte Plaqué
		2749	
			Gr. Buritirama
			Gr. Igarapé Bahia
		2760	Gr. Grão-Pará
		2763	Complexo Luanga
			Gr. Pojuca
		2770?	Gr. Salobo
		Meso	2859
	3002		Complexos Granulíticos (Pium e Bacajá)

Figura 2.2 – Coluna lito-estratigráfica do CCI proposta por Docegeo (1988), com adaptações de Araújo & Maia (1991), Macambira & Lafont (1995), Pinheiro & Holdsworth (1997) e Huhn et al. (1999).

Figura 2.3 - Mapa geológico da área de Serra Leste (Veneziani e Okida, 2001).



2.2.2 - Grupo Grão Pará

O Grupo Grão Pará (Docegeo, 1972) é composto por uma unidade basal de metabasaltos e metariolitos (Formação Parauapebas - Meireles et al., 1984) e uma unidade de rochas metassedimentares (Formação Carajás - Liandrat, 1972), onde concentram-se os depósitos de Fe.

Araújo et al. (1988), com base nas relações geométricas entre essas unidades e sua natureza, definem o Grupo Grão Pará como uma sequência vulcano-sedimentar instalada ao longo de um sistema transcorrente, vinculado à evolução do CCI. Os autores inserem ainda a Formação Rio Fresco no Grupo Grão Pará, sob a denominação Formação Águas Claras; definem os grupos Igarapé Pojuca e Igarapé Bahia, apontando-os como unidades indissociáveis do Grupo Grão Pará, face à continuidade física e semelhanças litológicas e deformacionais. Os autores ressaltam ainda que o Grupo Grão Pará evoluiu em uma bacia ligada a um sistema transcorrente, preenchida na fase distensiva por espessa sequência vulcano-sedimentar; durante a fase de inversão da bacia, os litotipos teriam sido lenticularizados e imbricados.

De uma maneira geral as unidades descritas na literatura como: Grupo Igarapé Salobo, Grupo Igarapé Pojuca e Grupo Igarapé Bahia, são correlacionáveis ao Grupo Grão Pará.

2.2.3 - Grupo Rio Novo

O Grupo Rio Novo engloba uma pilha metavulcano-sedimentar, com rochas básicas de composição toleítica e calcio-alcalina, na base, seguidas de metassedimentos xistosos de caráter aluminoso (muscovita/sericita-quartzitos, meta-arenitos, filitos ferruginosos, manganésíferos e carbonosos) e formações ferríferas bandadas. Níveis de vulcânicas félsicas e sedimentos clásticos ocorrem subordinadamente. Essas rochas foram metamorfozadas no fácies xisto-verde,

e mais restritamente no fácies anfíbolito. Variam desde rochas com xistosidade bem desenvolvida até rochas maciças, isotrópicas ou com foliação incipiente. Docegeo (1995) denominou esse conjunto como domínio vulcano-sedimentar e o correlacionou ao Grupo Grão Pará.

A expressão geomorfológica desta unidade é um relevo levemente ondulado, com serras alinhadas em direções diversas ou formando platôs. Em geral, as maiores elevações são sustentadas por afloramentos de formações ferríferas. O solo é argiloso, pouco desenvolvido e o perfil de intemperismo tem profundidade bastante variada, normalmente pouco espesso, porém, mais profundo que nos terrenos gnáissicos do Complexo Xingu.

2.2.4 - Grupo Rio Fresco

O Grupo Rio Fresco é constituído por uma seqüência essencialmente metassedimentar clástica, metamorfoseada no fácies xisto verde, e composta por metaconglomerados, metarenitos e metapelitos. Metassedimentos químicos ocorrem subordinadamente.

Os metaconglomerados ocorrem desde brechas com fragmentos angulosos (Sul de Serra Pelada) até tipos com seixos arredondados, indicando alto retrabalhamento (Barreira Caída). Os metarenitos apresentam granulometria, composição e coloração variadas, desde creme-amarelados (tipos mais puros), avermelhados (tipos ferruginosos) até cinza escuro a negro (tipos manganésíferos, com até 6% de Mn). São compostos essencialmente por quartzo (ortoquartzitos). A sua granulometria varia de fina a média e a textura é granoblástica. Quanto ao grau de consistência, podem variar, desde extremamente friável, assemelhando-se a areia de praia, até compacto, nos tipos silicificados. É comum a presença de vênulas de quartzo e caulinita, com espessura milimétrica.

Os metapelitos apresentam tipos com coloração cinza a cinza escuro (manganésíferos) e com coloração avermelhada dada pela alteração da clorita. A tentativa de mapear as variações de silito vermelho e cinza não foi bem sucedida, pois as variações ocorrem, também, em função do grau de intemperismo (Docegeo, 1995). São compostos por quartzo (40-50%),

sericita/caulinita (50-40%), leucóxênio, óxidos de ferro e manganês, carbonato amorfo e sulfetos (pirita, calcopirita, arsenopirita, bornita e covellita), além de calcocita/digenita, carrolita e siegenita, como acessórios. Apresentam estruturas sedimentares bem preservadas, como estratificação plano-paralela, laminação convoluta, estruturas de carga, marcas de onda e estratificação com gradação granulométrica. Essas rochas apresentam também estruturas resultantes de deformação tectônica, como fraturas, foliação, crenulação e lineação mineral.

DOCEGEO (1988), define o Grupo Rio Fresco, sobreposto ao Supergrupo Itacaiúnas, englobando uma espessa seqüência de sedimentos clásticos finos a grosseiros, com contribuição química subordinada (formação ferrífera bandada, carbonatos e cherts). Associam-se a essa unidade, as jazidas de Mn do Azul e de Au de Águas Claras. Na proposta litoestratigráfica de Araújo & Maia (1991), as rochas do Grupo Rio Fresco foram reenquadradas na Formação Águas Claras, constituindo a componente sedimentar da seqüência supracrustal do Grupo Grão Pará, e limitada aos domínios do Sistema Transcorrente Carajás.

Nogueira et al. (1995), redefine esta unidade como Formação Águas Claras, sendo composta por arenitos e pelitos com diferentes graus de litificação e alteração hidrotermal, posicionando-a sobre as seqüências dos Grupos Igarapé Pojuca e Grão Pará. Com base na abundância relativa de sedimentos mais finos e grosseiros na seqüência, a Formação Águas Claras foi subdividida, por Nogueira et al. (1994), em um Membro Inferior, composto por siltitos, pelitos e arenitos finos, e um Membro Superior, que inclui arenitos finos a grossos, ortoconglomerados e pelitos subordinados. Desta forma, os sedimentos descritos por Nogueira (op. cit.), como formação Águas Claras, são correlacionáveis aos sedimentos descritos como Grupo Rio Fresco.

A geomorfologia desta unidade é marcada por áreas altas e aplainadas ou com serras alinhadas, com destaque para a Serra do Sereno, ao norte da área. O perfil de intemperismo é variado, podendo ser bastante espesso, como é o caso do garimpo de Serra Pelada (onde o nível de intemperismo está em torno de 200 m de profundidade), mas é predominantemente pouco espesso, não ultrapassando alguns metros.

2.2.5 - Rochas intrusivas

Uma série de corpos de rochas ígneas, de idades e naturezas diversas, intrudem as unidades acima, sendo separados em três grupos: corpos granitóides, corpos máfico-ultramáficos (Complexo de Luanga) e corpos gabróicos.

2.2.5.1 - Granitos Arqueanos

A Suíte Plaquê (Araújo et al., 1988) compreende granitóides lenticulares e estratóides, identificados, primeiramente, entre os pacotes rochosos do Complexo Xingu e concentrados no vale entre a Serra dos Carajás e a Serra do Cinzento (Martins e Araújo, 1979; Jorge João et al., 1987). As rochas dessa suíte apresentam-se como corpos abaulados, alongados, raramente ultrapassando 100 metros de altitude relativa. São monzogranitos (dominantes), granodioritos e sienogranitos, maciços ou foliados, com textura granoblástica equidimensional ou porfiroclástica, interpretados como produto da anatexia crustal ocorrida durante a implantação do CCI (Araújo et al., 1988). As idades dessa suíte estão entre 2729 e 2749 Ma (Macambira e Lafon, 1999; Huhn et al., 1999).

A Suíte Estrela é composta por monzogranitos e sienogranitos sin-tectônicos, que afloram na forma de batólitos na porção oriental do CCI. Essas rochas apresentam idades entre 2532 Ma (Barros et al., 1997) e 2550 Ma (Barros e Barbey, 1998).

Ambas suítes apresentam estreita correlação espacial com as mineralizações de Cu–Au de Salobo, Pojuca, Sossego e Cristalino.

2.2.5.2 – Granitos Paleoproterozóicos

Intrusivos no CCI ocorrem diversos batólitos graníticos, compostos de granitos, monzogranitos e sienogranitos, que formam uma suíte de granitos anorogênicos com idades variando entre 1.890 e 1.870 Ma (Machado et al., 1991; Macambira e Lafont, 1995). São rochas

de granulação média a grossa, isotrópica, com textura Rapakivi. É comum a presença de intensa venulação de quartzo, contendo calcopirita, bornita, molibdenita e fluorita. Em muitos casos, observa-se estreita relação espacial entre esses granitos e uma série de depósitos de Cu-Au, conhecidos na região.

No extremo oeste da área, aflora o batólito granítico Cigano, de forma elipsoidal, com diâmetro maior no sentido N-S (~ 30 km) e menor no sentido E-W (~20 km). Apenas a borda leste deste batólito aflora na área de estudo. É classificado como um granitóide Paleoproterozoico anorogênico, de idade 1.8 Ga (Hirata et al., 1982). Docege (1984) associa este corpo ao mesmo evento gerador do Granito Central da Serra dos Carajás. Dall'Agnol et al. (1986) concluíram que o Granito Cigano (GC) possui composições monzograníticas, sendo raros os termos granodioríticos ou sienograníticos. Esses autores dividem o corpo em duas fácies principais. Uma delas ocorre nas porções externas do maciço, onde há a dominância dos tipos equigranulares, grosseiros a médios. Uma outra fácies ocorre no centro do batólito, onde predominam os granitos de granulação média, cor cinza e composição monzogranítica, truncados por microgranitos, aplitos e rochas pegmatóides. Morfologicamente, o GC apresenta dois aspectos distintos: na margem direita do rio Parauapebas, mostra-se completamente arrasado, formando colinas na parte central; na margem esquerda, exibe um aspecto enrugado com a rede de drenagens em ravina. As relações de contato do CG com rochas encaixantes são discordantes, intrusivas e acontecem ao Norte com o Complexo Xingú, e a Sul, Oeste e Leste, com as rochas do Grupo Rio Novo.

2.2.5.3 – Corpos Máfico-ultramáficos - Complexo Luanga

O Complexo Máfico e Ultramáfico de Luanga ocorre na forma de um sill, posicionado sin a tardi-tectonicamente na Sequência Rio Novo. Estudos geocronológicos pelo método U-Pb (Machado et al., 1988), determinaram uma idade de 2.763 +/- 6 Ma para a intrusão. Essa unidade compreende um complexo máfico-ultramáfico acamadado, constituído de uma zona

ultramáfica inferior (dunitos, peridotidos, websteritos, bronzititos, cromititos e noritos) e uma zona máfica superior (anortositos, noritos e gabros), metamorfoseados em condições de fácies xisto verde. Essas rochas ocorrem na porção central da área, encaixadas em rochas do domínio vulcânico do Grupo Rio Novo, e são as hospedeiras das mineralizações de EGP (Elementos do Grupo da Platina) que ocorrem na região.

Rochas semelhantes a estas ocorrem nas áreas mapeadas como unidade ultramáfica do Grupo Rio Novo, inclusive com mineralizações de EGP, sugerindo que estas unidades são correlacionáveis, podendo representar o termo plutônico do magmatismo que gerou as vulcânicas do Grupo Rio Novo.

2.2.5.4 - Corpos Gabróicos

Dois tipos de corpos gabróicos ocorrem na região de Carajás. Um primeiro tipo aparece como corpos maciços, localmente orientados, e apresentam textura fina a grossa, ou mesmo porfírica. Localmente, apresentam-se intensamente fraturados ou truncados por zonas de cisalhamento. Esses corpos são relacionados a eventos tardios em relação à deposição da seqüência Rio Novo e são correlacionáveis ao plutonismo gerador das intrusões máficas e ultramáficas acamadadas.

O segundo tipo de corpos gabróicos ocorre encaixado em importantes falhamentos falhamentos regionais de direção dominante N-S, que truncam todas as unidades estratigráficas da região, desde o Complexo Xingu (Arqueano) até os granitóides Paleoproterozoicos (1.8 Ga). Ocorrem como diques e sills de natureza básica, representados por gabros e diabásios a hiperstênio, com magnetita e algumas vezes com pirita disseminada. Essas rochas não exibem traços de metamorfismo e deformação e estão relacionadas a eventos mais recentes, possivelmente Neoproterozóicos.

2.3 - Ambiente Geotectônico

Os anfibolitos do Grupo Salobo correspondem a basaltos toleíticos continentais, o que é evidenciado pelo enriquecimento em LILE e ETRL (Lindermayer et al., 1995). Essas rochas basálticas são muito semelhantes às vulcânicas do Grupo Grão Pará, o que indica, segundo os autores, que ambas as suítes tem uma origem comum, relacionada ao evento magmático ocorrido na bacia de Carajás no final do Arqueano.

As rochas básicas do Grupo Grão Pará registram um vulcanismo toleítico submarino, tendo sido alteradas por processos de epidotização, cloritização, carbonatização e silicificação (Hirata et al., 1982). Os autores distinguiram dois tipos de rochas magmáticas: o primeiro inclui rochas grosseiras, por vezes contendo fenocristais; o segundo corresponde a rochas de granulação muito fina, sem fenocristais, com cavidades mirolíticas e textura intergranular, de origem claramente extrusiva.

Para Gibbs et al. (1986), os basaltos e riolitos do Grupo Grão Pará pertencem a uma associação de natureza bimodal, formada em ambiente continental. Diversos aspectos geoquímicos, tais como o enriquecimento em K, Rb, Ba e ETRL e o empobrecimento em Th, Nb, Sr, P e Ti, em relação ao observado em outros basaltos, são atribuídos a diferentes graus de assimilação de uma componente granítica, o que também explicaria as variações hoje encontradas na sequência, desde basaltos à basaltos andesíticos. As paragêneses metamórficas de fácies xisto verde na sequência seriam devidas à processos hidrotermais. Estes autores, com base nos dados apresentados por Ferreira Filho (1985), correlacionaram as vulcânicas básicas do Grupo Bahia às vulcânicas básicas do Grupo Grão Pará, sugerindo também que a sequência da Mina do Igarapé Azul é correlacionável à sequência superior do Grupo Grão Pará.

Dardenne et al. (1988) interpretaram o vulcanismo basáltico a basáltico andesítico do Grupo Grão Pará como tendo afinidade shoshonítica. Segundo os autores, essas rochas teriam sido formadas em um arco magmático vinculado a um complexo de subducção no Arqueano.

Esta hipótese diverge daquela apresentada por Gibbs et al. (1986), o que coloca dúvidas sobre o ambiente tectônico no qual foi gerado o magmatismo básico do Grupo Grão Pará.

A Sequência Rio Novo (Hirata et al., 1982) ou Grupo Rio Novo (Araújo et al., 1988; Araújo et al., 1991), segundo estes autores, constitui uma seqüência vulcano-sedimentar, do tipo greenstone belt, metamorfisada, incluindo os metassedimentos que formam a Serra do Sereno, a Formação Serra Pelada (Jorge João et al., 1982) e o Complexo Máfico-Ultramáfico Luanga.

Os dados geocronológicos disponíveis sobre a região indicam que o CCI foi afetado por pelo menos dois eventos tectono-metamórficos. O primeiro ocorreu entre 2,77 e 2,73 Ga, relacionado à formação das bacias onde foram depositadas as seqüências vulcanossedimentares; o segundo ocorreu entre 2,58 e 2,5 Ga, relacionado à granitogênese que gerou a Suíte granítica Estrela.

Um evento magmático datado entre 1,89-1,87 Ga foi o responsável pela intrusão dos batólitos graníticos anorogênicos, entre eles o Granito Central de Carajás e o Granito Cigano, relacionados a processos distensivos que afetaram a porção oriental do Cráton Amazônico neste período (Macambira & Lafont, 1995).

2.4 - Contexto Estrutural

Siqueira (1996), descreve a compartimentação tectônica do CCI, propondo uma evolução para o sistema transcorrente Cinzento, com ênfase na sua extremidade oeste. Este lineamento é hospedeiro dos depósitos de Cu – Au do Salobo, e é descrito por este autor, como pertencente a um segmento curvo, transtensivo, ao longo da zona de cisalhamento principal de uma estrutura duplex, denominanda Salobo Mirim.

A área de Serra Leste, foco dessa dissertação, hospedeira dos depósitos de Au de Serra Pelada e de Elementos do Grupo da Platina (EGP) do Luanga, está localizada na porção extremo Leste do sistema transcorrente Cinzento, que é a principal estrutura mapeada na área (Figura 2.4). A terminação leste do sistema transcorrente do Cinzento é caracterizada por um "splay" divergente, denominado por Pinheiro & Holsworth (1997) "Splay" Divergente Serra Pelada

(SDSP), formando uma estrutura em rabo de cavalo, que inclui falhas de cavalgamento e dobramentos associados, reativados por dilatação extensional. Segundo esses autores, o SDSP foi formado no Arqueano sob regime transcorrente dextral, tendo sido posteriormente reativado e tectonicamente invertido sob cinemática sinistral.

Pinheiro & Holdsworth (1997) descrevem uma história deformacional complexa para o CCI, marcada por cinco eventos, que ocorreram durante um período superior a um bilhão de anos, entre 2,8 e 1,0 Ga. A evolução do CCI, segundo esses autores, foi caracterizada pela formação de um sistema complexo de falhas transcorrentes, em um ambiente que evoluiu de dúctil para rúptil, intercalando períodos de movimentação dextral e sinistral, levando a uma variação de regimes transpressivos e transtensivos, conforme ilustrado na Figura 2.5.

Veneziani e Okida (2001) situam a região de Serra Leste no "Horse Tail Splay" (HTS) de Serra Pelada (HTSSP), assim como Pinheiro (2001). Nas áreas de HTS, o regime transtensivo é predominante e caracterizado por componentes verticais de deslocamento, principalmente ao longo das direções paralelas ao tensor de máximo esforço (σ_1) e, secundariamente, nas direções subparalelas a este tensor. Segundo Veneziani e Okida (op.cit.) estruturas secundárias podem ocorrer associadas, em função do nível crustal e da propagação das zonas de cisalhamento, possibilitando a existência de sub-splays rúpteis a rúpteis-dúcteis, *rhombo-chasms* e duplexes divergentes.

Veneziani e Okida (op.cit.), descrevem, ainda, três fases principais de deformação na área do HTSSP:

- Primeira Fase de Movimentação: nesta fase as rochas do embasamento foram intensamente deformadas. Esta fase é caracterizada por desenvolvimento de fabrica dúctil, verticalização, intensa milonitização, transposição e estiramento, principalmente ao longo das direções E-W. Esta deformação é claramente identificada nas rochas do embasamento (Complexo Xingu) e caracteriza um processo de cisalhamento simples, não coaxial, dúctil, em regime de deformação progressiva. Durante a movimentação sinistral da zona de Cisalhamento Transcorrente do

Cinzento (ZCTC) principal (em torno de E-W) criaram-se as condições para a geração do HTS na região de Serra Leste. Os blocos delimitados pela Zona de Cisalhamento Transcorrente Sereno Sul (ZCTSS), Zona de Cisalhamento Transcorrente Luanga Norte (ZCTLN), Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cotia (ZCTCO), Zona de Cisalhamento Trativa de Curionópolis (ZCTrC), Zona de Cisalhamento Transcorrente Curionópolis (ZCTC), Zona de Cisalhamento Transcorrente Curionópolis NW-SE (ZCTCNW-SE) e Zona de Cisalhamento Transcorrente Curionópolis N-S (ZCTNS) (Veneziani e Okida, op.cit.), foram deformados sob transpressão, mecanismo este favorável ao desenvolvimento dos splays e subsplays divergentes e, secundariamente, dos duplexes divergentes. Em níveis crustais superiores, esse evento transpressivo gerou estruturas do tipo *rhomb-chasms* e *rhomb-grabens*. Os autores citam que o regime tectônico desta fase foi responsável pela geração de ambientes favoráveis à intrusão do

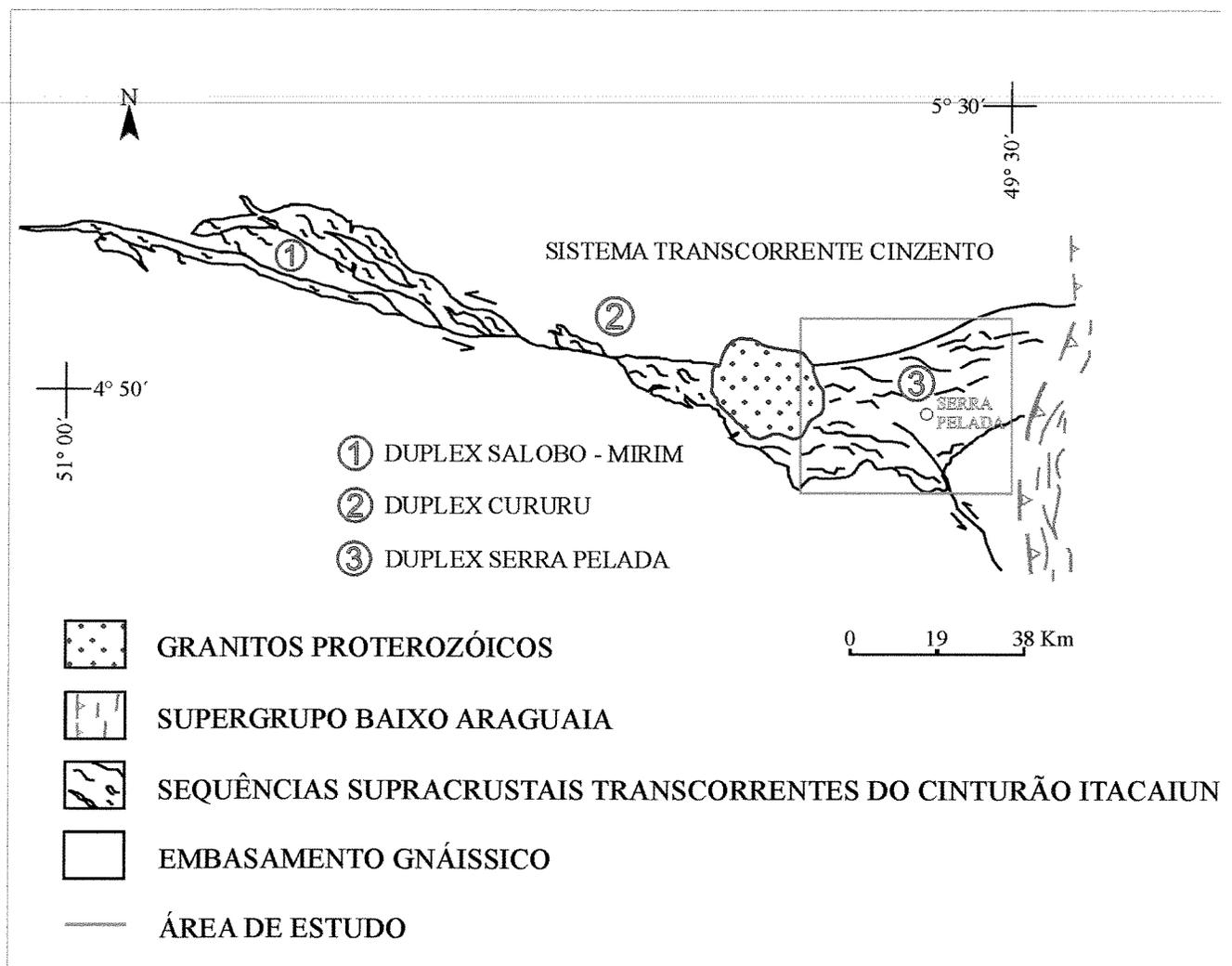
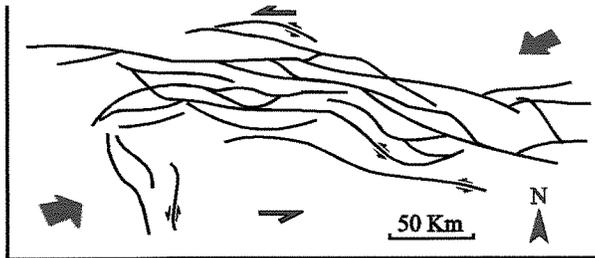


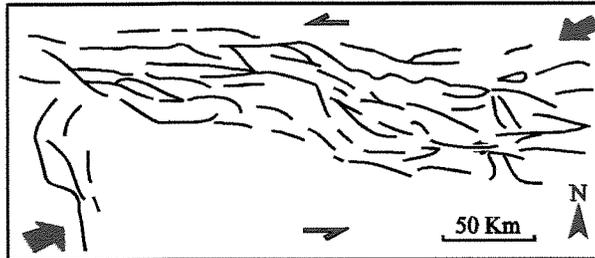
Figura 2.4 - Sistema Transcorrente Cinzento (adaptado de Costa *et al.* 1995)



1

> 2,8 Ga
Zona de cisalhamento Itacaiunas
Complexo Granítico - Gnáissico
(Xingu + Pium + Bacajá)

Transpressão Sinistral Dúctil de alta T
Deposição do Grupo Pojuca



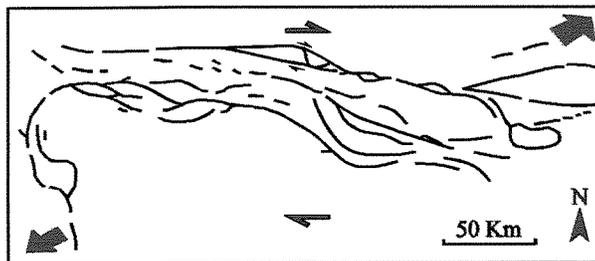
2

2,8 - 2,7 Ga
Deformação do
Grupo Pojuca

Transpressão Sinistral Rúptil-Dúctil de baixa T

Deposição do Grupo Grão-Pará

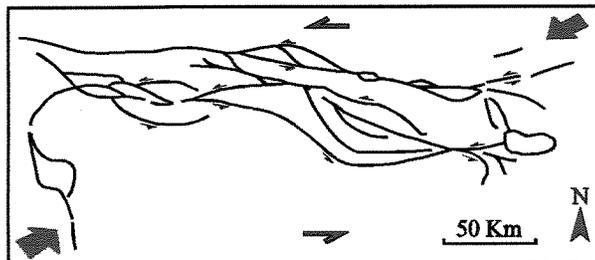
Deposição da Formação Águas Claras



3

< 2,6 Ga
Grupos Pojuca, Grão - Pará,
Igarapé Bahia e Formação
Águas Claras preservados
em vazios distensionais
escalonados
Intrusões de Granitóides
(2,5 - 2,6 Ga)

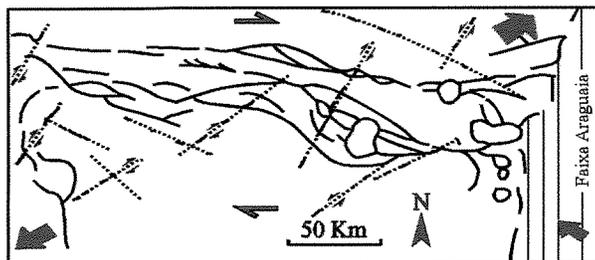
Transtensão Dextral Rúptil



4

> 1,9 Ga
Deformação localizada
sobretudo ao longo das zonas
de Falha Carajás e Cinzento

Transpressão Sinistral Rúptil



5

1,9 / 1,8 - 1,0 Ga
Intrusões de Granitos
e diques básicos
Deposição da
Formação Gorotire

Transtensão Dextral & Extensão

Figura 2.5 - Evolução estrutural da região de Carajás segundo Pinheiro & Holdsworth (1997)

Complexo Luanga, bem como do vulcanismo, intrusões e sedimentação dos constituintes do Grupo Rio Novo, além de intrusões graníticas correlacionáveis à Suite Estrela.

- Segunda Fase de Movimentação: entre 2,8 e 2,65 Ga ocorreu um importante transporte tectônico de massa, de NE-SW para NW-SE. As ZCTs principais acompanharam linhas de fraquezas crustais orientadas em torno de N70-80W. Falhas sintéticas passaram a ser orientadas no quadrante NE, a partir de NNE-SSW, e no NW, no sentido horário (de E-W para N) até N50W. As falhas antitéticas sinistrais orientaram-se entre N40-50W até NNE-SSW. O arrasto das unidades geológicas foi notável, o que modelou as formas dos corpos rochosos que constituem os Complexos Luanga e Luanga Sul. Esses complexos, posicionados paralelamente/sub-paralelamente à Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento, infletem para Norte no Complexo Luanga e para Sul no Complexo Luanga Sul, mostrando claramente a movimentação dextral ao longo da direção E-W. Nesta fase foram geradas estruturas tais como foliações miloníticas nas rochas de nível crustal mais profundo (embasamento, Grupo Rio

Novo, granitos da suite Estrela), e foliação cataclástica/clivagem de fratura e zonas de cisalhamento rúptil transcorrentes nos níveis estruturais mais rasos.

- Terceira Fase de Movimentação: nesta fase, as principais linhas de fraquezas crustais da região foram reativadas. O período de atuação desta fase situa-se pós 2,6 Ga e pré 1,8 Ga, pois deformou as rochas da Formação Águas Claras e não deformou os granitos Cigano, Central e correlatos. O transporte tectônico de massa foi de NE para SW, com as linhas de fraqueza crustal orientadas em torno de N75W.

2.5 – Metalogênese

A Província Mineral de Carajás (PMC) é considerada uma das principais províncias minerais do planeta e desperta o interesse das principais mineradoras de todo o mundo. Ela apresenta uma das maiores reservas mundiais de minérios de ferro, manganês e ouro, além de um grande número de depósitos e ocorrências de ouro, cobre, níquel, platina e paládio.

As rochas do Grupo Grão Pará são as principais hospedeiras de mineralizações na PMC, entre elas as jazidas de ferro (N4, N5, N1, etc.), de ouro do Igarapé Bahia, e de cobre e ouro do Alemão/Igarapé Bahia, Sossego e Cristalino. Porém, quase todas as unidades lito-estratigráficas da região são hospedeiras de depósitos e ocorrências minerais.

As mineralizações cupro-auríferas da PMC foram formadas por processos hidrotermais e são relacionadas à família de depósitos do tipo Fe-Cu-Au-U e Elementos Terras Raras (Huhn, 1996; Huhn e Nascimento, 1997; Oliveira et al., 1998). Esta classe de depósitos é descrita em diversas partes do mundo (Hitzman, 1992; Thompsom et al., 1999; Williams & Pollard, 1998) merecendo destaque os depósitos de *Olympic Dam* (Austrália) e Candelária (Chile). Essas mineralizações podem ocorrer: (i) confinadas em estratos piroclásticos, como é o caso da Jazida do Igarapé Bahia e no depósito Alemão; (ii) como corpos maciços preenchendo zonas de fraturas e zonas de brechas de fraturamento hidráulico (padrão *stockwork*), como nos depósitos de Sossego e Cristalino, que são relacionados à estruturação rúptil e hidrotermalismo metassomático gerado por intrusões ígneas.

Para Mougeot (1996) as mineralizações auríferas da PMC são polifásicas. As mineralizações primárias foram formadas em domínio crustal ou mantélico em 2,8 Ga. Posteriormente, foram afetadas por processos de remobilização associados às intrusões dos granitos anorogênicos em 1,8 Ga. e também por processos de remobilizações posteriores.

A mineralização de Cu - Au - U e Elementos Terras Raras da jazida de Igarapé Bahia é hospedada pela sequência vulcano-sedimentar arqueana, reunida no Grupo Igarapé Bahia. Os corpos de minério definem uma estrutura elipsoidal e estão associados a uma zona subvertical de brechas, localizadas no contato entre uma unidade composta por rochas vulcanoclásticas (*footwall*), e uma unidade composta por tufo laminados epiclásticos e rochas sedimentares (*hangingwall*). As brechas mineralizadas incluem tanto fragmentos do *footwall*, quanto do *hangingwall*, que são cimentados por quantidades variáveis de clorita, siderita, magnetita e calcopirita. Grunerita, K-feldspato, muscovita e stilpnomelano são restritos às variedades de brechas mais ricas em magnetita. Os corpos mineralizados são truncados por diques de gabros granofíricos. A alteração hidrotermal inclui propilitização, potassificação e albitização. As fases minerais subordinadas são ilmenita, magnetita, titanita, barita, ankerita, pirita, calcopirita, galena, esfarelita, molibdenita e minerais de urânio e terras raras (Tallarico et al., 2000).

Segundo Ferreira Filho (1985), as rochas do Grupo Igarapé Bahia foram afetadas por dois eventos metamórficos. O primeiro ocorreu ainda no assoalho oceânico, causando espilitização das rochas, com formação de actinolita, saussuritização do plagioclásio e transformação da titanomagnetita em intercrescimento de magnetita e ilmenita em treliça, porém preservando as texturas originais. Essas rochas, em função deste primeiro evento, apresentam ganhos de H₂O, CO₂, Na₂O e K₂O, e perda pouco pronunciada de CaO. O segundo evento de alteração hidrotermal foi responsável pela obliteração das texturas originais das rochas básicas e pelas mineralizações metálicas, dando origem às seguintes fases dominantes: clorita, quartzo, epidoto, calcita, titanita e ilmenita. Neste estágio houve enriquecimento de FeO₂, H₂O, Cu, S, CO₂ e empobrecimento em Na₂O e K₂O.

Ribeiro & Villas (1990) descreveram na sequência das rochas do Igarapé Bahia dois eventos hidrotermais. Um primeiro ocorreu devido à circulação convectiva no fundo do mar, gerada através de fraturas nas lavas basálticas. O segundo evento foi associado à colocação de granitos anorogênicos e à atuação de esforços distensivos, responsáveis, respectivamente, pela acentuada elevação do grau geotérmico e reativação de fraturas. Estes dois fenômenos permitiram a circulação dos fluidos e a geração de veios mineralizados em Cu, Au, Mo e Ag.

A jazida de Cu – Au do Alemão, hospedada em rochas do Grupo Igarapé Bahia, é representada por brechas hidrotermais e hidrotermalitos classificados em dois tipos. O tipo BMS (Brecha Magnética Sulfetada) é composto por bandas maciças de magnetita e calcopirita e por brechas polimíticas, com uma matriz composta de magnetita, calcopirita, siderita, clorita, biotita e anfibólios. O tipo BCLS (Brecha Clorítica Sulfetada) é representado por rochas vulcânicas brechadas e hidrotermalizadas; calcopirita, bornita, pirita, molibdenita, clorita, siderita, turmalina, fluorita, apatita, uraninita e minerais de ouro e prata, encontram-se preenchendo fraturas em padrão *stockwork* e disseminados na rocha encaixante (Soares et. al., 2000). O corpo mineralizado é recoberto por rochas siliciclásticas da Formação Águas Claras, com 250 metros de espessura. As dimensões do corpo são de 500 metros de extensão e 50-200 metros de largura. Os recursos estão estimados em 170 milhões de toneladas a 1,6 % de Cu e 0,9 ppm de Au.

A jazida de Cu e Au do Sossego ocorre no contato entre as rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará ao Norte e os gnaisses do Complexo Xingu a Sul. A mineralização é relacionada à alteração hidrotermal potássica e sódica, contendo escapolita, apatita, magnetita, actinolita e, como fase sulfetada, calcopirita (predominante) e bornita (subordinada). Esta paragênese encontra-se hospedada em estruturas rúpteis representadas por brechas e fraturas em padrão *stockwork*. Os recursos desta jazida estão estimados em 355 milhões de toneladas a 1.1 % de Cu e 0,28 ppm de Au (Oliveira et. al., 2000).

A jazida de Cu e Au do Cristalino é associada a uma estrutura de direção N-NW, que representa uma zona de cisalhamento transcorrente, denominada Serra do Rabo. O minério está

hospedado em corpos dioríticos, basaltos (maciços a foliados, algumas vezes cisalhados), andesitos e rochas vulcanoclásticas intercaladas a formações ferríferas do Grupo Grão Pará. A mineralização é relacionada a uma intensa atividade hidrotermal, incluindo alteração potássica e sódica, silicificação e metassomatismo férrico. Esse hidrotermalismo foi caracterizado pela introdução de grandes volumes de óxidos de ferro pobres em titânio (magnetita), com menores quantidades de fosfatos (apatita), sulfetos de cobre e ferro (calcopirita, pirita, além de cobaltita, milerita, vaesita e milerita) e outros minerais de Au, U, Ag e Co, menos comuns. Os minerais da paragénese hidrotermal estão hospedados em estruturas rúpteis, particularmente fraturas em padrão *stockwork*, veios e brechas. Sulfetação disseminada ocorre associada aos corpos dioríticos. Os recursos deste depósito estão estimados em 500 milhões de toneladas, com 1% de Cu e 0,3 ppm de Au (Huhn et. al., 2000).

A jazida de Cu e Au do 118 é hospedada por granitos (isotrópicos a foliados) e gnaisses a Sul e por uma sequência metavulcânica, composta por clorita xistos, xistos magnéticos, meta riolitos e tufos, intrudidos por gabros e granitos, a Norte. Na porção central da sequência metavulcânica ocorre uma zona subvertical de brechas tectônicas e hidrotermais, que definem uma elevação alinhada de direção N60°W, com aproximadamente 250 metros de altura. Essa zona compreende rochas graníticas intensamente cloritizadas e rochas máficas (gabros e xistos) com matriz composta por sulfetos (calcopirita, pirita e bornita), com silicificação e carbonatação (siderita) associadas. O perfil de intemperismo ultrapassa 100 metros de profundidade. Os recursos deste depósito estão estimados em 100 milhões de toneladas, com 1,0% de Cu e 0,3 ppm de Au no horizonte de intemperismo e mais 70 milhões de toneladas de minério sulfetado com teores similares (Rigon et. al., 2000).

Na jazida de Au e Cu de Águas Claras, a mineralização ocorre associada a falhamentos de caráter rúptil-dúctil, com mergulhos superiores a 65°, os quais estão relacionados a um sistema de pares conjugados, predominantemente de direção E-NE e subordinadamente N-NW, embora sejam também observados corpos de minério encaixados em falhamentos de direção Norte (e.g. Águas Claras, Leal, Estrada). Essas falhas foram geradas durante eventos de

reativação do sistema transcorrente arqueano da Falha de Carajás (Pinheiro & Holdsworth, 1997). Os corpos de minério apresentam-se, em superfície, afetados por intensa alteração supergênica, constituindo gossans, carapaças lateríticas e zonas caulinizadas associadas a veios de quartzo, remanescentes do processo de alteração. Nas zonas superficiais, elementos como cobre e outros de maior mobilidade estão ausentes, tendo sido completamente lixiviados pelos processos meteóricos. Em profundidade, os corpos mineralizados são constituídos por veios de quartzo e sulfetos, em geral, com predomínio da fase sulfetada (calcopirita > bornita > pirita > arsenopirita > pirrotita). As zonas de alteração hidrotermal, compostas por sericita, caulinita, clorita e turmalina, estão associadas às bordas dos corpos de minério.

..... A região de Serra Leste hospeda diferentes tipos de ocorrências minerais. Além do depósito de Cu e Au de Serra Verde, que apresenta características semelhantes aos depósitos do tipo Au e Cu da PMC descritos em epígrafe, outros depósitos de ouro foram verificados nos garimpos do Marlon, Formiga e Cutia, provavelmente associados a mineralizações de Au e Cu em profundidade. Ocorrem ainda importantes mineralizações de elementos do grupo da platina (EPG), como é o caso do garimpo de Serra Pelada e o depósito Luanga, que podem ser considerados depósitos do tipo Au e EGP.

No garimpo de Serra Pelada, a mineralização é epigenética e mostra um forte controle estrutural, estando hospedada em uma sequência de meta-arenitos e siltitos, carbonosos e carbonáticos, metamorfizados em condições da fácies xisto verde. Essa sequência está situada em uma zona de charneira de uma dobra sinformal reclinada, apertada, de escala regional. A mineralização de ouro e EGP (Pt, Pd, Rd, Ir, Os, etc) está associada a brechas hidrotermais com magnetita e ricas em hematita, zonas maciças com magnetita e hematita metassomáticas, zonas com intensa alteração sericítica e um envelope de jasperóide (sílica amorfa). A geoquímica da mineralização de Au e EGP em Serra Pelada mostra muitas similaridades com a geoquímica dos depósitos da classe Fe-Cu-Au da PMC e de outras províncias do planeta, no que tange à associação de metais (Co, Ni, Cu, U) e ao enriquecimento em elementos terras raras leves (Grainger et al., 2001). O Hg ocorre associado à mineralização de Serra Pelada e tem sua

ocorrência registrada em diversos depósitos de origem hidrotermal, hospedados em metassedimentos, como nos depósitos distais do modelo pórfiro (Sillitoe & Bonham, 1990). Um modelo relacionado a uma intrusão epicontinental é sugerido para essa mineralização em função: (i) da assembléia encontrada nas rochas carbonáticas (quartzo, dolomita, clorita, actinolita, biotita, muscovita, magnetita e em menor quantidade, calcita, turmalina, hematita, pirita, calcopirita, molibdenita, galena, digenita e minerais de urânio e terras raras); (ii) da presença de uma intrusão de diorito alterado hidrotermalmente sob a mineralização; (iii) do domínio de estruturas rúpteis que hospedam a paragênese hidrotermal (Tallarico et al., 2000). Ainda, segundo este autor, a alteração supergênica foi decisiva para a concentração econômica de Au, Pt e Pd. A mineralogia do minério inclui quartzo, caulinita, goetita, óxidos de manganês, muscovita e carbono amorfo. A mineralização abaixo da zona de intemperismo não é conhecida. A CVRD estima recursos indicados da ordem de 6 milhões de toneladas de minério com 4,5 ppm de Au, 1,0 ppm de Pt e 1,32 ppm de Pd.

No Complexo de Luanga, a mineralização de EGP e Au é contida num corpo encaixado em um pacote de metapiroxenitos (bronzititos e websteritos), paralelo a uma estrutura subvertical de terceira ordem do sistema transcorrente Cinzento (uma falha de segunda ordem da falha do Cutia/Lineamento Cinzento). As principais rochas intrusivas do complexo (gabros leucocráticos e melanocráticos, noritos, piroxenitos, peridotitos e dunitos), caracterizam-se pela associação de cromita com ortopiroxênio (bronzita), e assemelham-se àquelas encontradas na zona superior do Complexo de Bushveld, onde camadas de bronzitito e cromita são comuns (Diella et al., 1994). As assembléias minerais existentes nos cromititos estratiformes contêm minerais do grupo da platina que podem ter se formado sob condições magmáticas, metamórficas de médio grau e/ou hidrotermais de alta temperatura (Suíta, 1996). Os minerais de platina encontrados neste complexo são dominados por sulfetos (pentlandita, pirrotita, braguíta, milerita e calcopirita) e arsenietos, que ocorrem finamente disseminados, associados com cromita e bronzita. Entre os EGP, os mais freqüentes são: Pt (platina), Pd (paládio), Rh (ródio) e Ru (rutênio), sendo mais raros Ir (irídio), Os (ósio) e Re (rênio). O Complexo Luanga inclui

recursos da ordem de 74 milhões de toneladas de minério de Au e EPG, até 225 metros de profundidade, com teores de 0,60 ppm de Pt; 0,88 ppm de Pd; 0,06 ppm de Rh, perfazendo 1.61 ppm de EGP e 0.06 ppm de Au. Exemplos de teores de Au e EGP tipicamente encontrados em amostras de cromititos do Complexo Luanga encontram-se sumarizados na Tabela 2.2. A gênese da mineralização ainda é tema de estudos, entretanto, dois eventos são postulados: um primário, com origem na câmara magmática, responsável pela concentração de EGP em um nível de rocha ultramáfica (piroxenito); e um segundo, caracterizado pela remobilização da mineralização primária e pela concentração de EGP em xistos máficos gerados a partir da deformação e metamorfismo das rochas ultramáficas.

Amostra	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au
LU1	7	3,4	21	40	1100	90	3,3
LU2	12	8,5	48	116	1800	400	6,8
LU3	62	47	95	566	8900	1050	9,8
LU4	18	16	88	214	2700	530	2,6
LU5	2	3,5	37	40	630	180	12
LU6	2	1,5	13	19	450	41	4,3
LU10	13	15	70	10	25	9	2,2

Técnicas Analíticas: Fire Assay e Neutron Activation Analysis

Limites de detecção: Os (1), Ir (1), Ru (5), Rh (0,2), Pd (2) e Au (0,5).

Tabela 2.2 - Concentração de PGE (ppb) e Au (ppm) no cromititos do complexo Luanga.

CAPÍTULO III

PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS, GAMAESPECTROMÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS DA ÁREA DE SERRA LESTE, SERRA DOS CARAJÁS, PARÁ.

3.1 – Introdução

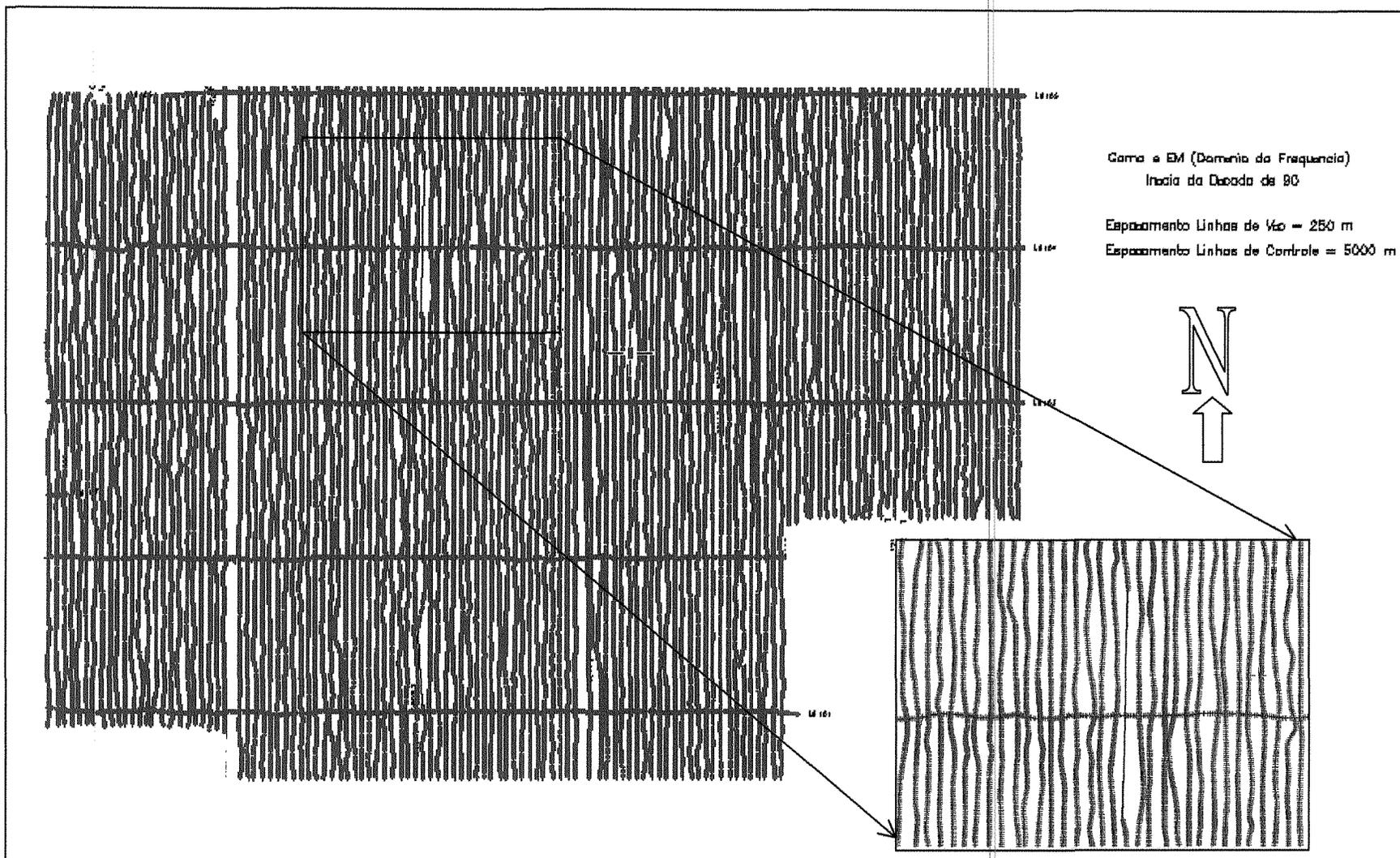
Este capítulo apresenta os métodos e procedimentos utilizados no pré-processamento e processamento dos dados geofísicos de alta resolução da região de Serra Leste, bem como os produtos derivados deste processamento. Foram utilizados dados magnetométricos, gamaespectrométricos e eletromagnéticos no domínio do tempo (GEOTEM).

3.2 – Materiais

Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos em dois levantamentos geofísicos distintos, realizados em junho de 1993 (empresa GEOMAG) e março de 1999 (empresa GEOTERREX-DIGHEM), sob contrato com a CVRD. O levantamento de 1993 foi feito através de um helicóptero biturbinado Bell, modelo 212; e o de 1999 com um avião CASA C-212. Os dois aerolevantamentos apresentam, portanto, um intervalo de seis anos e foram efetuados sob plataformas distintas. Os dados brutos gerados nos dois levantamentos foram pré-processados pelas empresas executoras.

No primeiro aerolevantamento (GEOMAG, 1993), foram adquiridos dados magnéticos, gamaespectrométricos e eletromagnéticos no domínio da frequência, que representam uma janela de 716.8 km² dentro da área estudada.. As linhas de vôo estão espaçadas de 250 m e as de controle, de 5000 m (Figura 3.1). A direção das linhas de vôo é N-S e perpendicular à orientação geral do Grupo Rio Novo, enquanto as linhas de controle são EW. A altura de vôo foi fixada em 120 metros sobre o terreno, e monitorada pelo radar altímetro Terra, modelo TRA. A altura do eletromagnetômetro.

Figura 3.1- Mapa de linhas de vôo do aerolevantamento gamaespectrométrico e eletromagnético no domínio da frequência (GEOMAG, 1993). As linhas de vôo estão espaçadas de 250 m e orientadas NS, enquanto as de controle são espaçadas de 5000 m e orientadas perpendicularmente às anteriores. O detalhe abaixo a direita mostra a exclusão de leituras devido problemas de posicionamento da aeronave (cruzamento de linhas).



foi monitorada por uma plataforma laser PS100E, enquanto a altitude do vôo foi controlada por um barômetro Rosemount 1241M3B1, com precisão da ordem de 10 pés (Geomag, 1993).

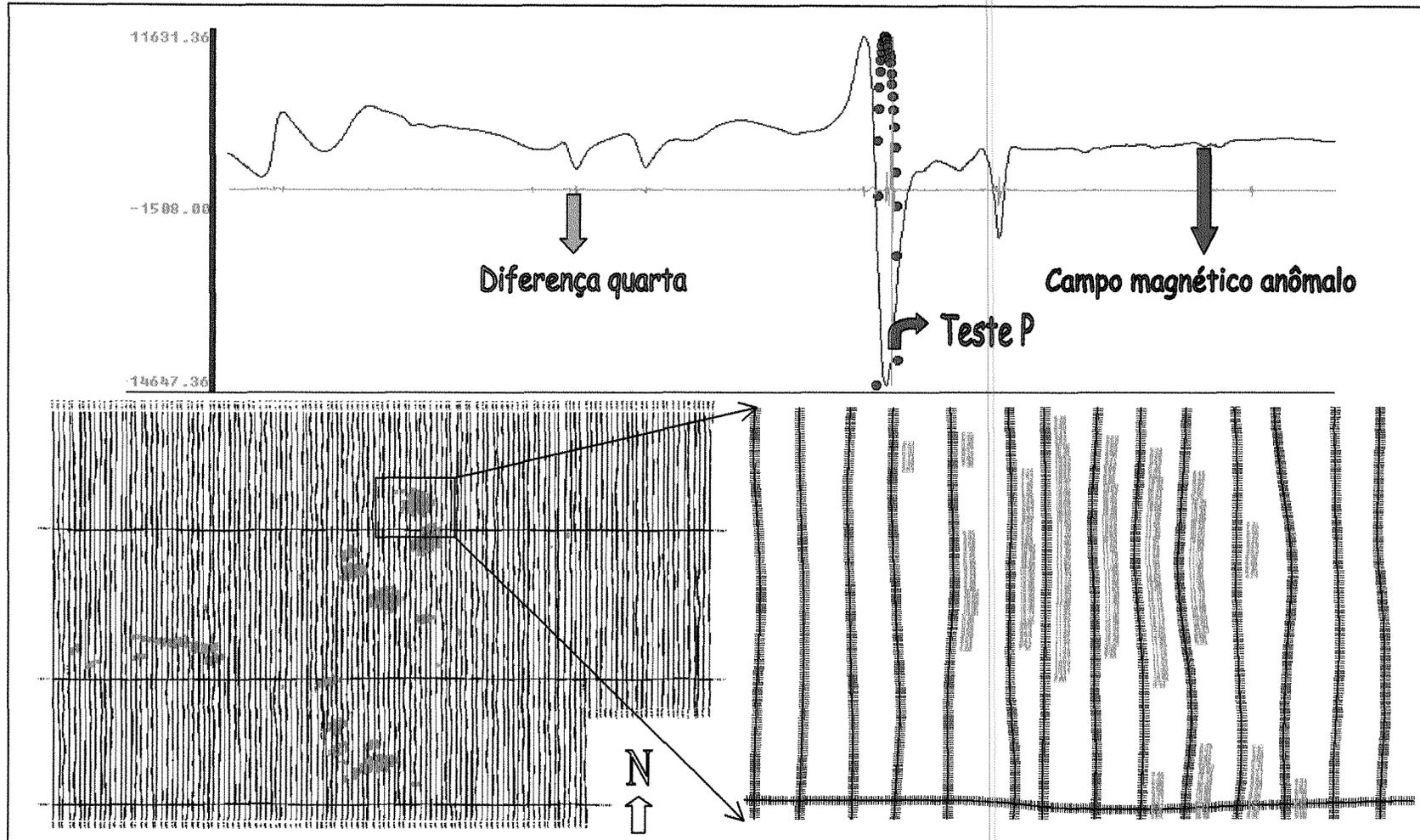
Os sistemas utilizados são de alta resolução, compreendendo um eletromagnetômetro de cinco frequências, magnetômetro de vapor de césio, gamaespectrômetro multicanal e o posicionamento efetuado por GPS (Sistema de Posicionamento Global). Devido à expressão areal do outro levantamento e resolução, serão utilizados somente dados gamaespectrométricos para o presente trabalho.

O sistema gamaespectrométrico (Exploranium, modelo GR-820) possui 256 canais espectrais e é constituído por quatro cristais de NaI ativado por tálio (4" x 4" x 16") com volume total de 1024 polegadas cúbicas. A aquisição foi efetuada a uma altura de 60 metros, com uma taxa de amostragem de cinco leituras por segundo, a cada seis metros. O procedimento de calibração do espectrômetro envolve a introdução de padrões radiométricos de referência de tório, urânio e potássio. A estabilização de ganho nas fotomultiplicadoras é mantida para cada cristal, com base no fotópico do potássio, que atua como isótopo de referência (Geomag, 1993).

Para controle da trajetória foi usado um sistema de posicionamento GPS da Trimble, modelo TANS II, acoplado a um microcomputador PNAV-2001, e um sistema de vídeo VHS para rastreamento das trajetórias percorridas pelo helicóptero.

No segundo aerolevanteamento (GEOTERREX-DIGHEM, 1999) foi utilizado um aeromagnetômetro e o sistema eletromagnético GEOTEM III Ltda (*GEOTerrex Transient ElectroMagnetic system*) da GEOTERREX. As linhas de vôo são espaçadas de 250 m e as de controle, de 6000 m (Figura 3.2). A direção das linhas de vôo é NS, ideal para uma melhor amostragem do gradiente do campo magnético em condições de baixas latitudes magnéticas, e as de controle EW. As coordenadas do ponto central da área são: latitude 6° 0' 14,72" S, longitude 40° 38' 42,56" W, declinação magnética -19,09 e inclinação magnética -2,14.

Figura 3.2 - Mapa das linhas de vôo do aerolevanteamento magnetométrico e eletromagnético no domínio da tempo (GEOTERREX-DIGHEM, 1999). As linhas de vôo de direção norte-sul estão espaçadas de 250 m, enquanto as de controle, leste-oeste, estão espaçadas de 6000 m. A figura exemplifica dois testes efetuados no pré-processamento dos dados para a avaliação e eliminação de ruídos, denominados de diferença quarta e parâmetro P (Blum, 1999). O perfil ilustra a consistência dos dados e ausência de problemas como ruído e posicionamento.



O magnetômetro é um CS-2 de vapor de césio, com sensibilidade de 0,01nT e frequência de amostragem de 10 Hz em ciclo contínuo. O equipamento foi acoplado à cauda da aeronave com um compensador dos efeitos de vôo, que foi realizado a 75 metros acima do terreno.

O sistema eletromagnético GEOTEM, no domínio do tempo, possui um receptor com três bobinas, duas horizontais, nas direções X e Y e uma vertical na direção Z, um transmissor com bobina de eixo vertical, com ciclos de 90 Hz, janela de pulso de 2 milisegundos e intervalo de amostragem de 4 Hz. O momento do dipolo é 693.000 Am². A bobina transmissora tem área de 232 m², eixo vertical, com três voltas. A separação horizontal entre o transmissor e o receptor é de 125 metros e a separação vertical entre transmissor e receptor é 50 metros (Figura 3.3).

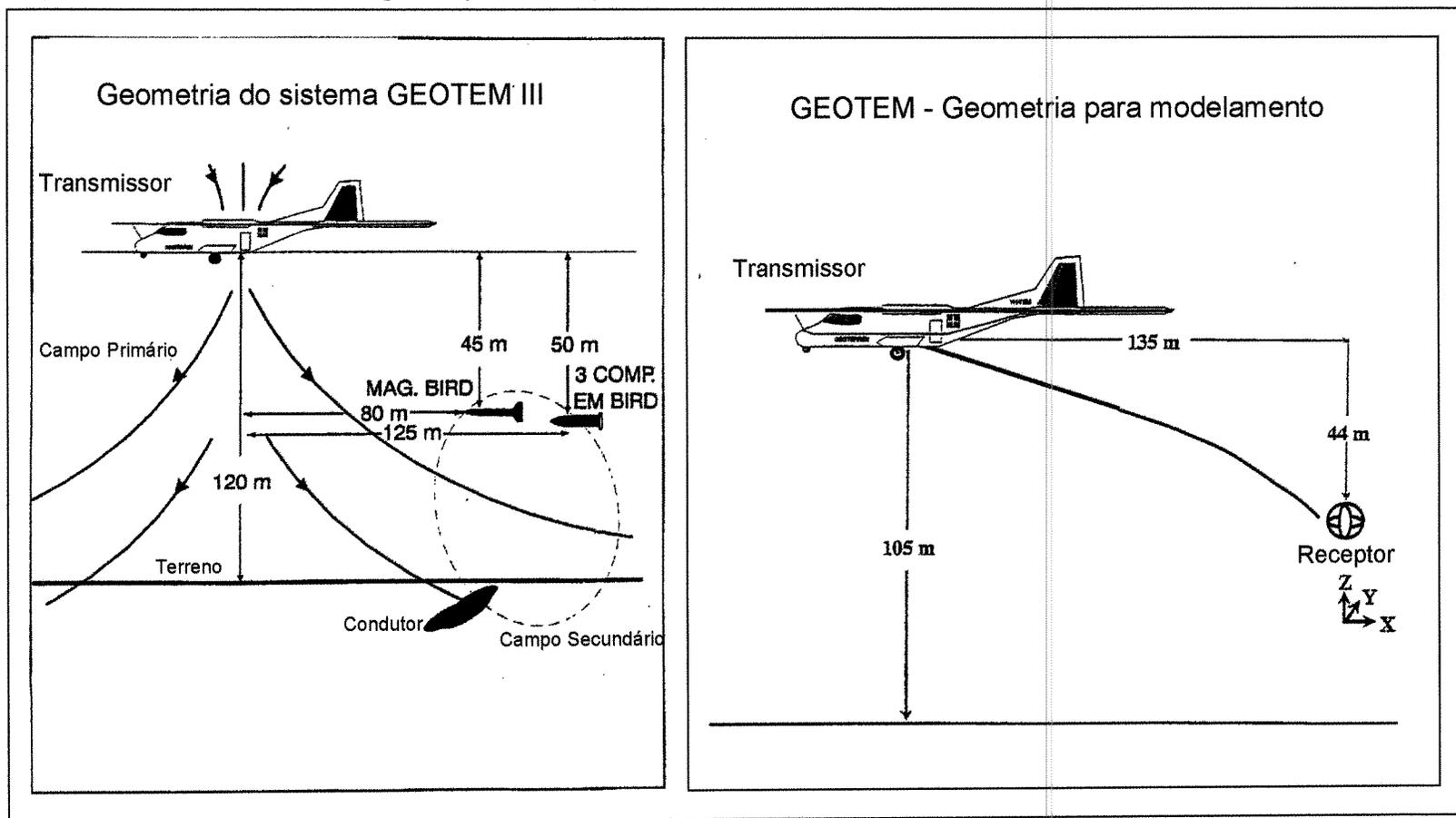
3.3 – Métodos

Os dados foram processados utilizando-se o pacote Oasis Montaj versão 5.1 da GEOSOFT, que contém ferramentas para processamento digital e análise de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos.

3.3.1 - Pré-processamento e o processamento dos dados aerogeofísicos de Serra Leste

O pré-processamento dos dados aerogeofísicos do Projeto Serra Leste consistiu na avaliação e eliminação de ruídos, devidos a erros na amostragem, posicionamento, problemas instrumentais e ambientais. Os dados foram avaliados quanto à presença de inconsistências como o efeito pepita (*nugget*) ou “picos” (*spikes*), e quanto à sua distribuição espacial e densidade. A análise foi efetuada através de mapas de linhas de vôo, perfis das linhas de vôo e da aplicação de dois testes denominados por Blum (1999) de diferença quarta e parâmetro P. Estes testes permitem a identificação de registros com valores fora do desvio padrão da população de registros. O método da diferença quarta consiste em substituir o valor de um ponto de uma linha de vôo pela diferença

Figura 3.3 - Arranjo do sistema eletromagnético GEOTEM, no domínio do tempo. O sistema GEOTEM possui um receptor com três bobinas, duas horizontais, nas direções X e Y e uma vertical na direção Z, um transmissor com bobina de eixo vertical. A separação horizontal entre o transmissor e o receptor é de 125 metros, enquanto que a vertical entre o transmissor e receptor é 50 metros (GEOterrex Transient ElectroMagnetic system, 1998).



entre o segundo ponto anterior e o segundo posterior ao ponto em questão. O Teste **P** visa restringir as anomalias e encontrar somente os “picos”. Assumiu-se que a distribuição dos dados é normal, com 99,7% deles com média em torno de ± 3 vezes o desvio padrão, e que o logaritmo de um número negativo não é real. A seguinte equação foi utilizada:

$$P = \log(|x - \bar{x}| - |3 \cdot \sigma|)$$

onde **P** é o ‘pico’, x é o dado em questão, \bar{x} a média dessas diferenças nos dados e σ o desvio padrão.

A equação anterior pode ser substituída pelo seguinte algoritmo: se $|x - \bar{x}| > |3 \cdot \sigma|$, então $p = 1$, caso contrário $p = 0$, onde p indicará se o dado deverá ser verificado ($p = 1$) ou não ($p = 0$) (Figura 3.3).

Na avaliação dos dados magnéticos e eletromagnéticos não foram observados problemas de posicionamento da aeronave ou superposição ou cruzamento de linhas, causados por sobrevôos. Casos de efeito pepita também não foram notados. Os principais problemas de cruzamento e superposição de linhas de vôo foram encontrados nos dados radiométricos. As leituras contidas em intervalos que apresentavam superposição ou cruzamento de linhas de vôo foram removidas dos dados (Figura 3.2). Os testes da diferença quarta e do parâmetro **P** mostraram a existência de ruídos nestes dados (Figura 3.3). Além disso, testes estatísticos aplicados aos dados gamaespectrométricos mostraram valores negativos nos canais de K (potássio) e U (urânio). Neste caso, a correção adotada foi a adição do valor mínimo referente a cada medida mais o desvio padrão (σ), conforme discriminado abaixo:

$\text{Canal de potássio corrigido} = \text{Canal de potássio} + \text{valor mínimo} + \sigma.$

O pré-processamento dos dados aeromagnéticos, constou da redução do IGRF (International Geomagnetic Reference Field)/DGRF (Definitive Geomagnetic Reference Field), a interpolação dos dados em malha regular e o micronivelamento dos (figura 3.4), com o intuito de permitir a aplicação de realces, que facilitem a interpretação geológica (Luyendick, 1997; Blum, 1999; Silva, 1999; Fuck, 2000).

A maior parte do campo magnético é produto da contribuição do núcleo magnético terrestre, que não é de interesse para mapeamento geológico e prospecção mineral. O procedimento correto é retirar esta influência dos dados magnéticos, através da subtração do IGRF (International Geomagnetic Reference Field)/DGRF (Definitive Geomagnetic Reference Field). O campo resultante é denominado de campo anômalo e representa o campo proveniente das fontes crustais acima da superfície *Curie*. Neste caso, as feições anômalas podem ser estudadas em termos de geofísica aplicada (Luyendick, 1997).

A extração do IGRF foi efetuada utilizando-se um algoritmo do Geosoft-Oasis Montaj 5.07 e aplicado em toda a base de dados, ponto a ponto. Foram calculados a latitude, longitude, inclinação e declinação para cada ponto amostrado, e então extraído o IGRF (1995), resultando no campo magnético anômalo.

A geração de uma grade regular implica na escolha de um método de interpolação eficiente. O procedimento inicial para a interpolação dos dados consiste em estabelecer o tamanho ideal da célula da grade, em função do espaçamento das linhas de vôo e da escala do mapa. A célula quadrada deve apresentar lado equivalente a um valor entre 1/4 do espaçamento das linhas de vôo. Este intervalo é considerado adequado para evitar grande perda de informação e degradação da imagem em virtude do aparecimento do efeito de *aliasing* (Silva, 1999). A escolha do método deve levar em conta a análise do espectro de potência ou espectro de energia (Spector & Grant, 1970), onde é indicado o comprimento de onda da área para amostragem e uma estimativa das profundidades das fontes na área de estudo.

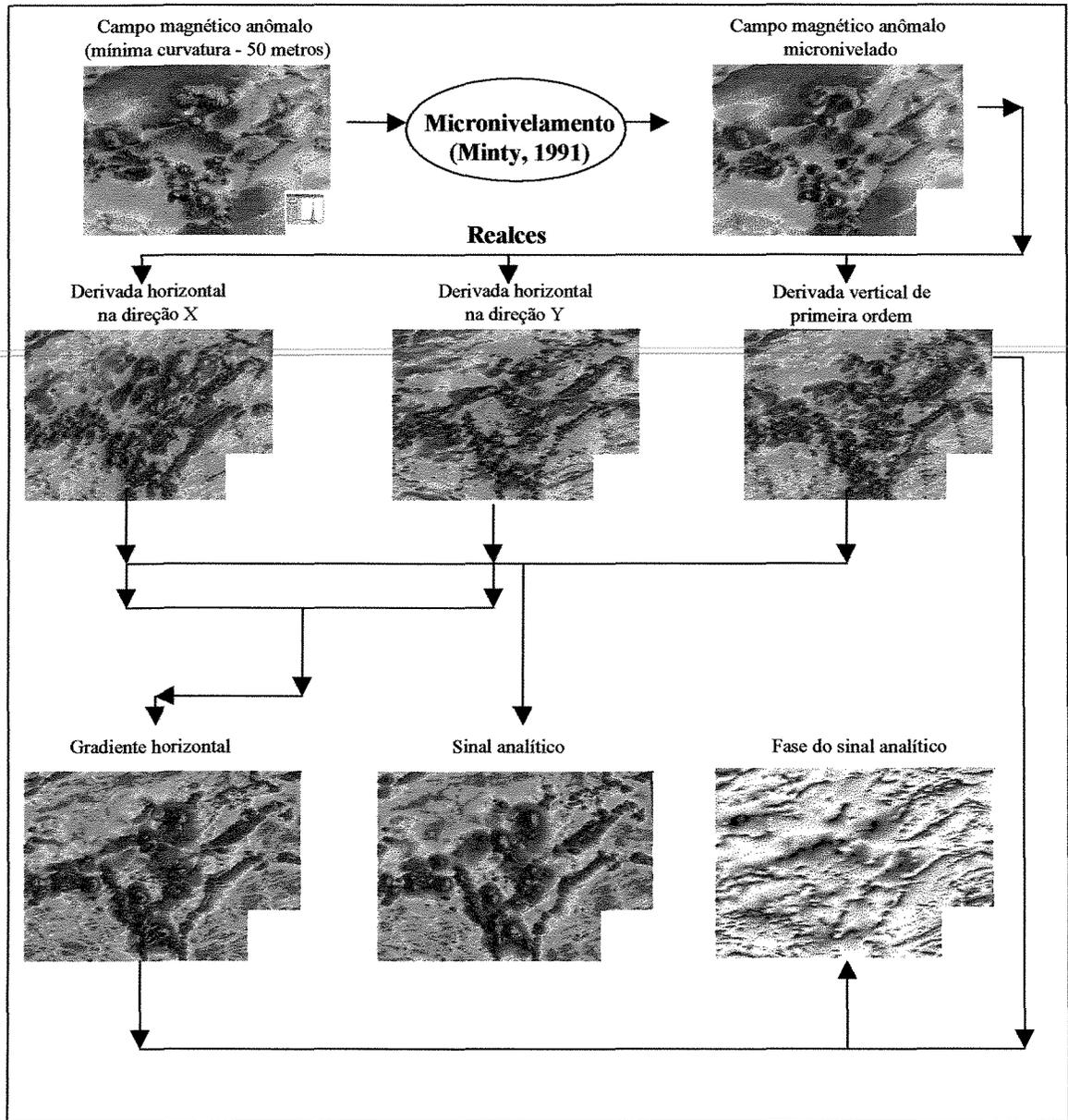
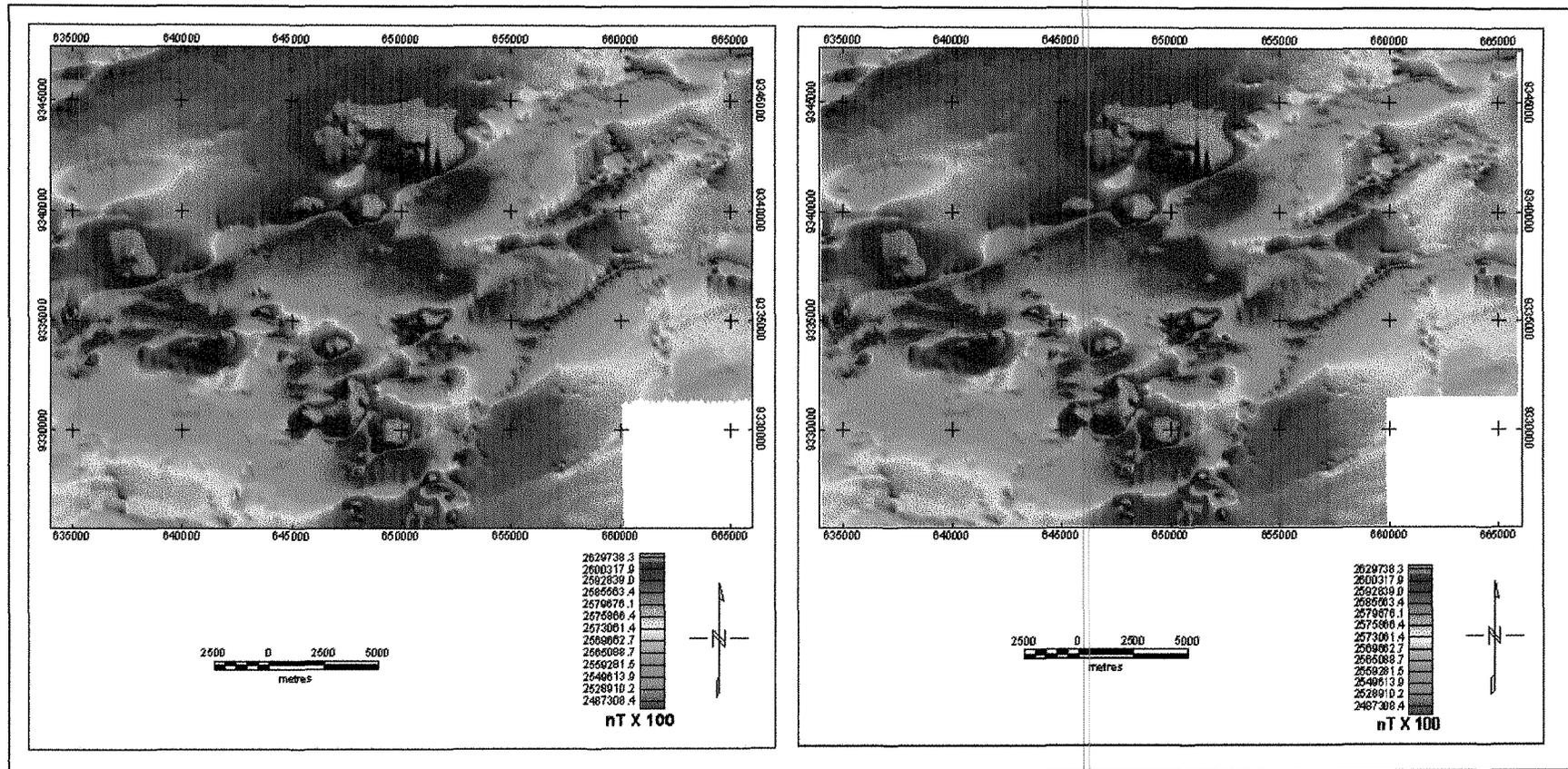


Figura 3.4 - Fluxograma mostrando o método utilizado no processamento dos dados magnetométricos.

O método da curvatura mínima é um dos mais usados nas geociências, por sua rapidez de processamento. A superfície gerada é análoga a uma placa fina e linearmente elástica, deformada, que passa por todos os dados com uma quantidade mínima de flexão (Briggs 1974, Swain 1976). O método *bi-direcional* é considerado um excelente interpolador para dados dispostos em linhas de vôo e utiliza um polinômio de terceiro grau. A interpolação pode ser feita de maneira linear, ao longo das linhas de vôo, com *spline* cúbico ou perpendicular, com *spline* de Akima (1970).

Os dados irregularmente espaçados, foram interpolados, neste trabalho, com uma célula de 62,5 m, utilizando-se dois métodos: curvatura mínima e o bi-direcional (*splines* bi-cúbicos). Entre os algoritmos testados aquele que ofereceu o melhor resultado foi o da curvatura mínima (RamGrid), depois de parametrizado adequadamente (Figuras 3.5a e 3.5b). O método bi-direcional mascarou algumas anomalias relevantes paralelas e/ou subparalelas às linhas de vôo, como aquelas relacionadas aos diques básicos de direção predominante N - S (mostrados na Figura 5.1- Capítulo 5).

As imagens geradas a partir dos dados aerogeofísicos, mostram imperfeições referentes ao nivelamento das malhas de amostragem. Para remoção destes ruídos, utiliza-se as técnicas denominadas micronivelamento ou decorrução. Neste trabalho optou-se pelo micronivelamento, utilizando-se a metodologia proposta por Minty (1991) e a rotina elaborada por Blum (1999). Minty (1991) indica que a remoção dos ruídos devido ao desnivelamento das linhas de vôo não causa a perda de altas frequências. O desnivelamento das linhas gera padrões com anomalias alongadas segundo as linhas de vôo. Essas anomalias caracterizam-se por estarem confinadas às linhas de vôo e por apresentarem comprimento de onda longitudinal, maior que o espaçamento entre as linhas de controle e comprimentos de ondas transversais. A técnica consiste na aplicação de filtros em duas direções ortogonais de uma malha (Minty, 1991; Blum, 1999). A verificação dos resultados é visual e a determinação dos valores de corte para os filtros é feita por tentativa e erro. A melhor combinação de comprimentos de onda nos filtros passa-alta e passa-baixa foi de quatro vezes o espaçamento das linhas de vôo (1000 metros) e de uma vez o espaçamento das linhas de



Figuras 3.5 – a) Imagem do campo magnético anômalo interpolada pelo método da curvatura mínima, iluminada de leste para oeste. b) Imagem do campo magnético anômalo interpolada pelo método bi-direcional, iluminada de leste para oeste. Ambas as imagens mostram artefatos N-S, provenientes de imperfeições após o nivelamento das malhas de amostragem.

controle. Alguns ruídos remanescentes, principalmente, nas áreas de baixa intensidade magnética, foram removidos através da aplicação de um filtro de média móvel, do tipo *Hanning*, com janela de 3x3 (Figura 3.6).

3.3.2 – Realce dos Dados Aeromagnéticos

Na observação do campo magnético anômalo, sem o auxílio das transformações lineares, é possível caracterizar algumas feições geológicas importantes: (i) duas anomalias com formas alongadas, com eixos orientados NE, localizadas na porção central da área, que coincidem com as rochas dos complexos Luanga e Luanga Sul; (ii) uma região magneticamente perturbada na porção central da área, que em profundidade pode representar uma série de corpos magnéticos, coincidentes com as áreas de afloramentos das unidades ultramáficas dos complexos máfico ultramáficos Órion e Afrodite; (iii) duas anomalias dipolares na região do depósito de ferro de Serra Leste, que representam a fácies magnética das formações ferríferas e o lineamento da Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento (ZCTC), orientado segundo a direção NW (Figuras 2.3 e 3.6). A ZCTC mostra um arrasto entre os complexos máfico ultramáficos Luanga e Luanga Sul, representado por um deslocamento sinistral entre essas unidades litoestratigráficas. Esse arrasto ocorreu em uma fase de deformação transpressiva, posterior àquela que modelou a forma dos complexos, visto que, a forma dos complexos sugere uma cinemática dextral. A cinemática dextral está relacionada a uma fase de deformação mais antiga, o que é compatível com os modelos de deformação polifásica, propostos por Pinheiro & Holdsworth (1997) e Veneziani e Okida (2001).

A análise do relevo do campo magnético anômalo foi auxiliada por transformações lineares, principalmente as referentes à amplitude e à fase do sinal analítico, a derivada vertical de primeira ordem e o gradiente horizontal total. A representação espectral generalizada dos campos magnéticos possibilitou uma série de transformações e realces nestes dados (Milligan & Gunn, 1997).

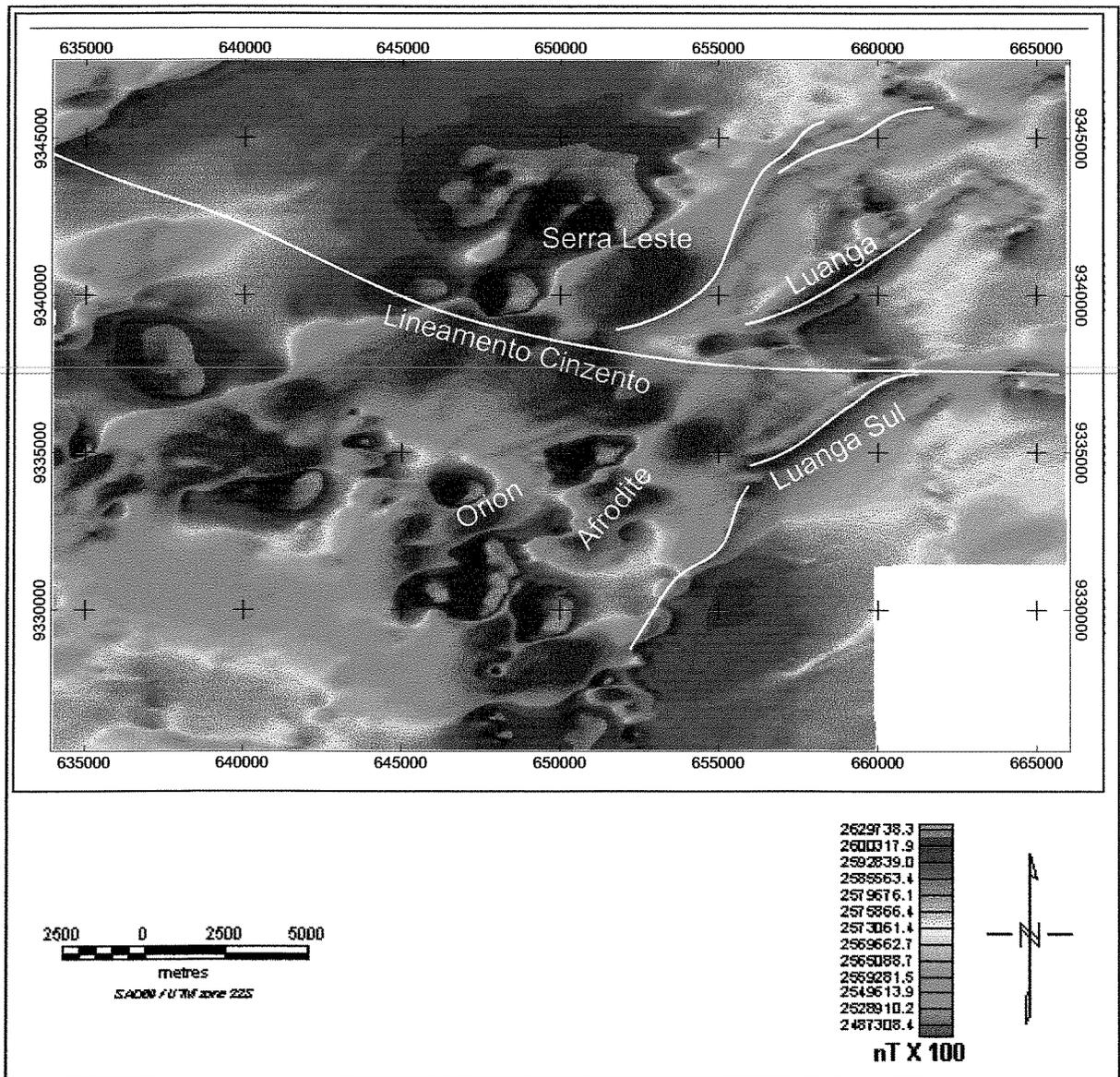


Figura 3.6 - Imagem do campo magnético anômalo, micronivelada e iluminada de leste para oeste. Alguns ruídos remanescentes, principalmente, nas áreas de baixa intensidade magnética, foram removidos através da aplicação de um filtro de média móvel, do tipo Hanning, com janela de 3x3. Observam-se as discontinuidades referentes: ao lineamento cinzento de direção WNW, às estruturas de segunda ordem do lineamento cinzento, ao acamamento ígneo nos complexos máfico ultramáficos Luanga, Luanga Sul, Órion e Afrodite e às formações ferríferas.

Essas transformações podem ser feitas no domínio da frequência ou do tempo. A análise inicial foi efetuada através do espectro radial de potência do campo magnético anômalo de Serra Leste. Entretanto, na imagem do campo anômalo observa-se a descontinuidade referente ao lineamento da ZCTC, de direção NW (Figura 3.5).

Os mapas transformados podem realçar feições pouco claras em outros produtos, tornando a análise e interpretação mais eficiente para fins geológicos. Neste trabalho, foram aplicados os seguintes filtros (Figuras 3.4):

- a) continuação ascendente do campo magnético anômalo;
- b) primeira derivada vertical do campo magnético anômalo;
- c) derivadas horizontais em X, Y e gradiente horizontal total do campo magnético anômalo;
- d) amplitude do sinal analítico do campo magnético anômalo;
- e) fase do sinal analítico do campo magnético anômalo;
- f) deconvolução de Euler.

A amplitude do sinal analítico, a derivada vertical de primeira ordem do campo magnético anômalo e a fase do sinal analítico, foram muito utilizadas nos últimos anos para ampliar as respostas dos sinais e delinear descontinuidades geológicas ou lineamentos, não perceptíveis na observação do campo magnético anômalo (Luyendyk, 1997, Milligan e Gunn, 1997), principalmente em condições de baixas latitudes magnéticas (Blum, 1999; Silva, 1999 e Fuck, 2000).

3.3.2.1 – Espectro Radial de Potência

A aplicação do método permite determinar a profundidade das fontes magnéticas a partir da declinação da curva do espectro de energia (Spector e Grant, 1970). Esta profundidade é estatisticamente determinada pela seguinte expressão:

$$h = -s/4 \pi$$

onde:

h = profundidade.

s = declividade do logaritmo de potência do espectro

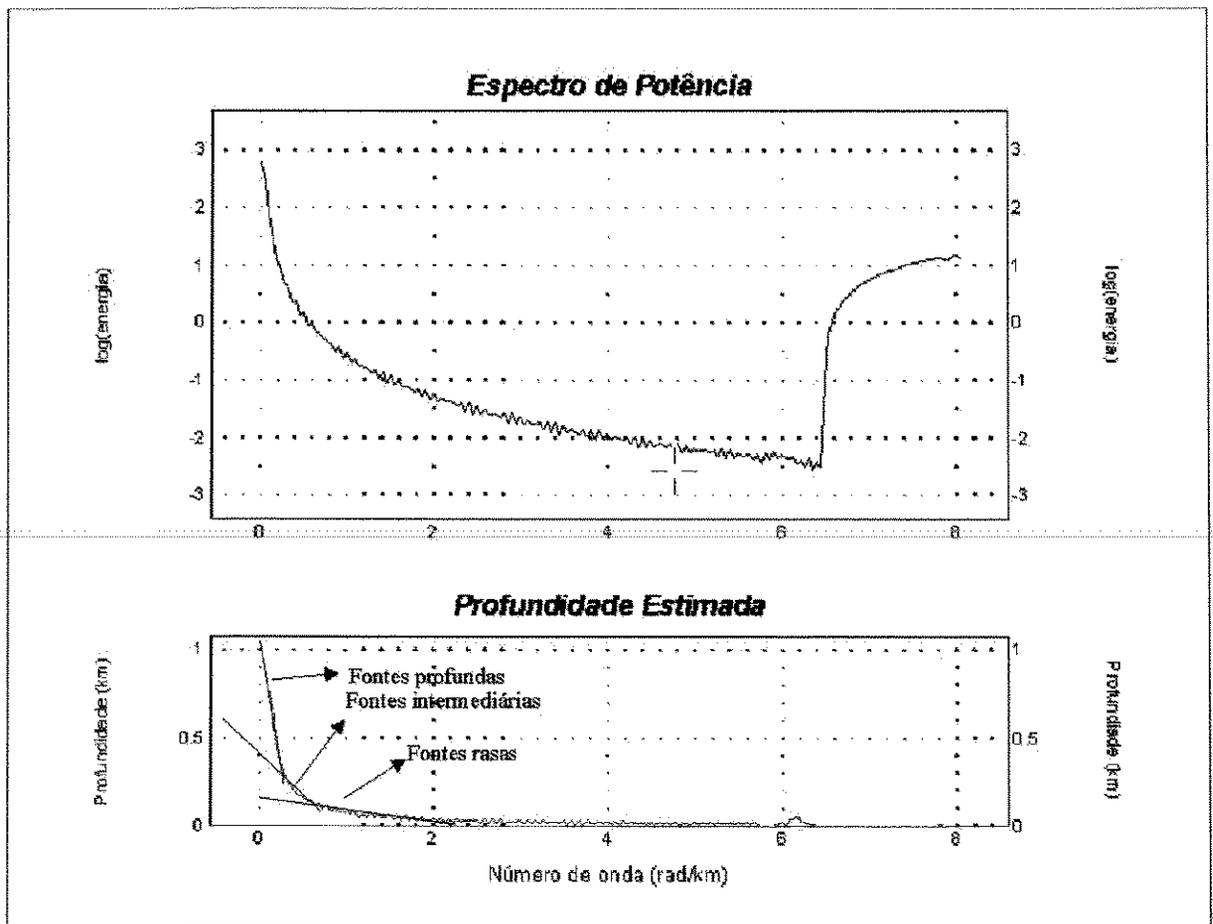


Figura 3.7 – Espectro de potência do campo magnético anômalo, indicando profundidade de 1km para as fontes profundas e 400 metros para as fontes intermediárias (cf. Spector e Grant, 1970).

A análise do espectro de potência do campo magnético anômalo de Serra Leste (Figura 3.7) mostra que os sinais significativos se prolongam até ao número de onda de $0,002 \text{ km}^{-1}$, indicando comprimentos de onda maiores que 500 metros. É importante ressaltar que este é o comprimento espacial de onda crítico (Nyquist) para a amostragem, no caso de um espaçamento de 250 m entre as linhas de voo. Comprimentos de onda menores representam ruídos e não devem ser considerados. As fontes mais profundas amostradas são da ordem de 1000 metros.

3.3.2.2 – Continuação ascendente do campo magnético anômalo

Este método opera a partir de dados de um campo magnético e gera a resposta deste campo em um “datum” situado acima do plano de observação. O processo tem uma resposta de frequência, dada por $H = e^{-h(u^2+v^2)^{1/2}}$, e um fator de profundidade que suprime as altas frequências, mostrando a influência das fontes mais profundas e reduzindo o efeito das fontes superficiais (Milligam & Gumm, 1997).

A continuação ascendente do campo magnético anômalo foi feita para uma altura de 187 metros, utilizando três vezes o espaçamento entre as linhas de vôo, conforme sugerido por Silva (1999). Nesta imagem, as feições magnéticas mais sutis, como as discontinuidades N-S geradas pelos diques de gabro e pelo lineamento da ZCTC, não são observadas ou são atenuadas. As unidades importantes da área são correlacionadas às zonas de alta frequência. Estas fontes, quando analisadas separadamente das fontes mais rasas, mostram-se similares nas imagens (Figura 3.8).

3.3.2.3 – Primeira derivada vertical do campo magnético anômalo

A primeira derivada vertical ou gradiente vertical é fisicamente equivalente a medida do campo magnético em dois pontos, um verticalmente sobre o outro, subtraindo o dado e dividindo a diferença pela separação espacial dos pontos de medida. Esse processo ressalta as altas frequências em relação às baixas frequências, caracterizando-o como um filtro passa alta. Pode ser aplicado como um filtro passa-baixa para remover o ruído de número de onda grande (Blakely, 1995).

Várias derivadas verticais podem ser calculadas pela multiplicação da amplitude do espectro do campo por um fator do tipo:

$$1/n[(u^2+v^2)^{1/2}]^n,$$

onde n é a ordem da derivada vertical. Teoricamente, quanto maior a ordem da derivada, maior a capacidade de discriminação de feições rasas. No entanto, é comum o uso de derivadas ficar restrito a segunda ordem, visto que, a partir desta, ocorre um aumento considerável dos ruídos nos produtos.

As derivadas dos campos potenciais têm sido amplamente utilizadas para ressaltar as respostas dos sinais de alta frequência. São eficientes para delinear descontinuidades associadas a estruturas, contatos litológicos e lineamentos. A Figura 3.9 apresenta a imagem da derivada vertical da primeira ordem.

3.3.2.4 – Derivadas horizontais em X, Y e gradiente horizontal total (GH)

As derivadas horizontais (n^{th}) nas direções X e Y são $(j_u)^n$ e $(j_v)^n$, respectivamente. Os picos de anomalias ocorrem sobre as bordas de corpos, melhorando a definição das bordas dos mesmos. Para Milligan e Gunn (1997), o uso das derivadas horizontais é bastante ambíguo para corpos estreitos. É utilizado para efeito de comparação com a derivada vertical, porém, pode não apresentar bons resultados dependendo das feições geológicas da região sob estudo.

A Figura 3.10 apresenta as imagens das derivadas horizontais, nas direções X e Y. Quando comparadas à da derivada vertical (Figura 3.9), observa-se uma maior preservação de bordas das fontes magnéticas, principalmente das estruturas de direção NE.

O gradiente horizontal total é definido pela equação (GH):

$$GH = \sqrt{a^2 + b^2}$$

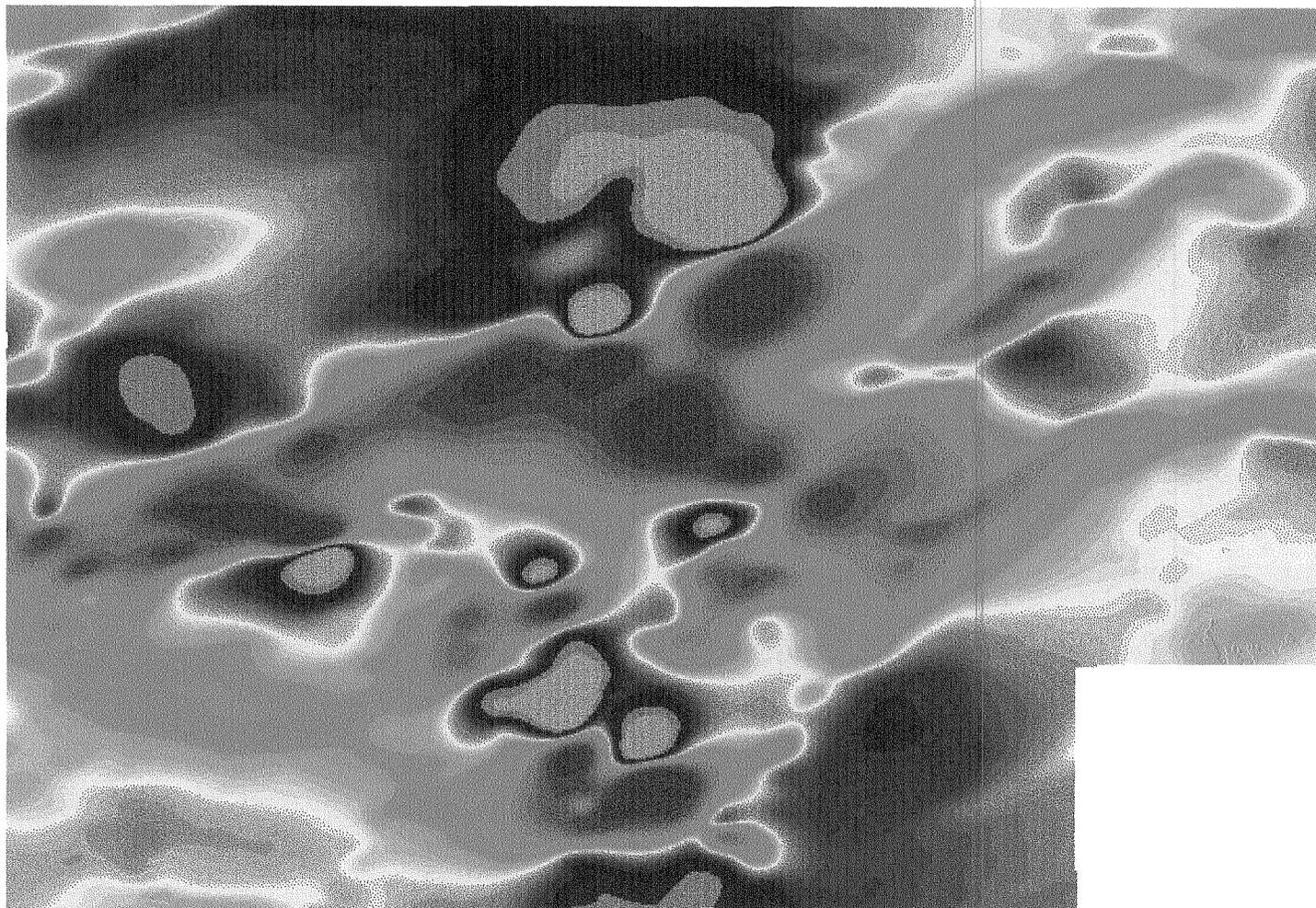
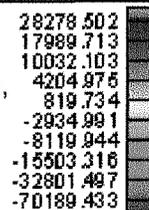
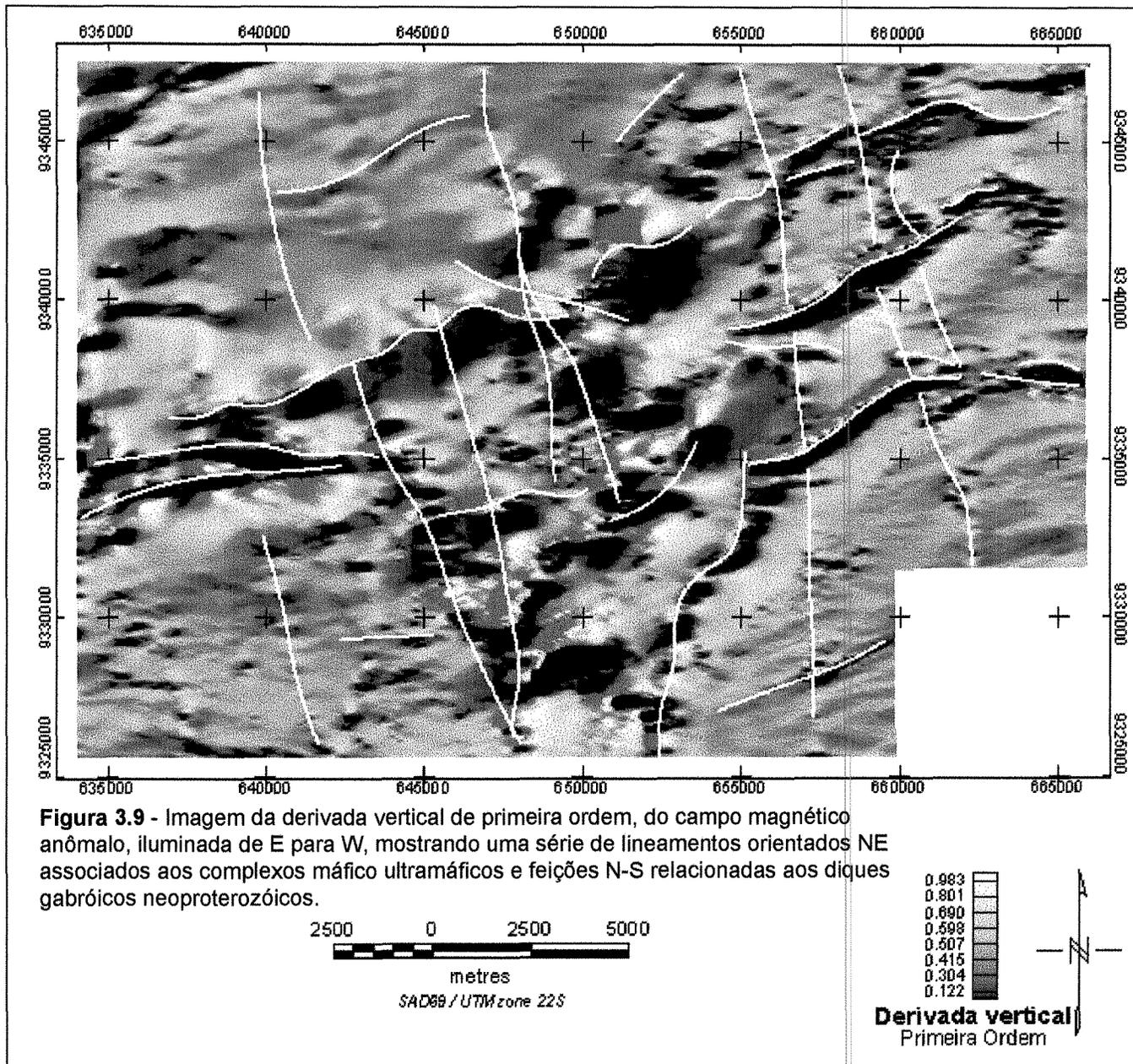


Figura 3.8 - Continuação ascendente do campo magnético anômalo para uma altura de 187 metros, ou seja, três vezes o espaçamento das linhas de vôo, conforme sugerido por Silva (1999). As unidades importantes da área são correlacionadas às zonas de alta frequência, que quando analisadas separadamente das fontes mais rasas, mostram a mesma expressão.



nT



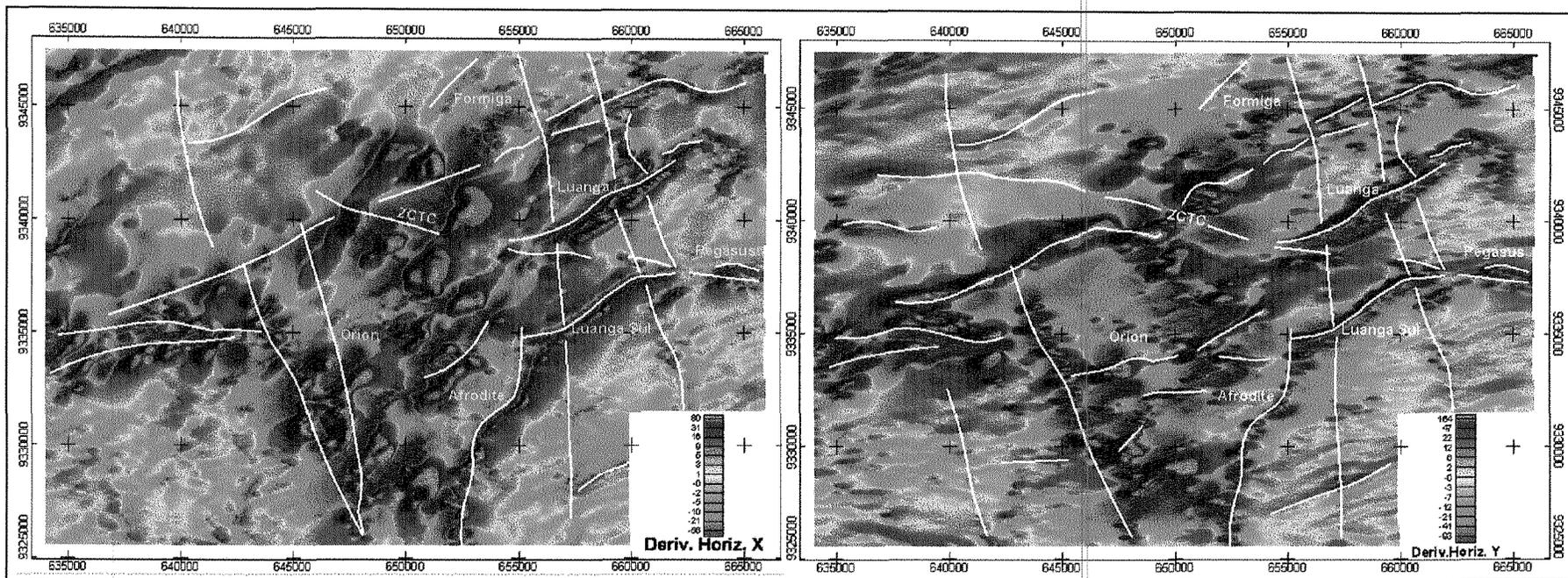


Figura 3.10 - Imagens em falsa cor das derivadas horizontais nas direções X e Y. Notar que essas imagens realçam as bordas, principalmente das feições NE, relacionadas às unidades ultramáficas dos complexos máfico ultramáficos. Mostram feições sutis de direção aproximada N-S, relacionadas aos diques de gabro com magnetita do Neoproterozóico. O lineamento da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (ZCTC) também pode ser observado.

onde, \mathbf{a} é a derivada horizontal na direção X e \mathbf{b} a derivada horizontal na direção Y. A figura 3.11 apresenta a imagem colorida pseudo iluminada do gradiente horizontal.

3.3.2.5 –Amplitude do sinal analítico de ordem zero (onde $n=0$)

A interpretação do posicionamento das anomalias magnéticas é complicada pela natureza dipolar do campo magnético e pela magnetização remanescente das rochas. Este comportamento gera uma assimetria das anomalias e deslocamento dos picos de respostas características de suas fontes causadoras, como inflexões, bordas ou centro dos corpos magnéticos, quando o campo induzido não é vertical. Isso faz com que a resposta de uma fonte magnética dependa de sua localização na superfície terrestre (Nabighian, 1972).

A amplitude do sinal analítico é uma função simétrica, cujos picos estão centrados nas bordas do corpo anômalo ou na feição geológica correspondente, facilitando a interpretação do dado magnético para fins geológicos. O sinal analítico não depende dos parâmetros do campo magnético terrestre e da direção de magnetização da fonte. Além disso, a amplitude do sinal analítico é proporcional a amplitude de magnetização da fonte. O resultado do sinal analítico caracteriza-se como um produto confiável para delimitação das fontes magnéticas em regiões de baixa latitude magnética (Milligan & Gunn, 1997).

O sinal analítico ou envelope de energia das anomalias magnéticas foi desenvolvido por Nabighian (1972), e foi definido inicialmente como "*um campo complexo derivando um potencial complexo*". É um conjunto de métodos automáticos ou semi-automáticos baseados no uso de derivadas horizontais e verticais. Compreende uma função real, que pode ser escrita como a função complexa $f(t) - iF_{Hi}(t)$, onde a parte real é dada por $f(t)$, a parte complexa $F_{Hi}(t)$ pela transformada de Hilbert, sendo o tempo (t) a variável independente. Para o campo potencial em duas ou três dimensões (2D ou 3D), os gradientes horizontal e vertical formam um par de transformadas de Hilbert ou sinais analíticos.

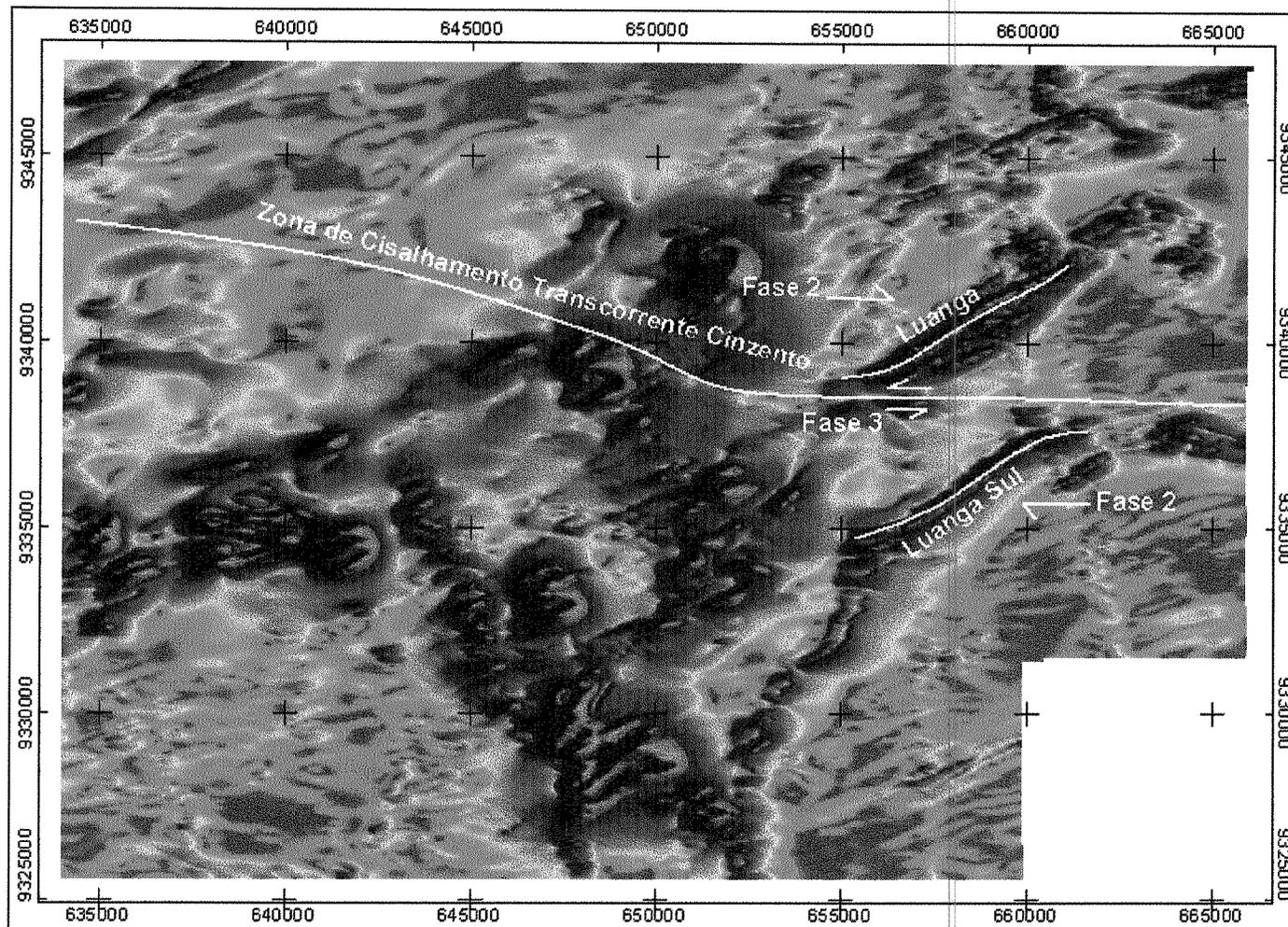


Figura 3.11 - Imagem falsa cor do gradiente horizontal, iluminada de E para W, mostrando um gradiente lateral para as anomalias magnéticas, com ampliação nas bordas. O lineamento cinzento é bem representado, indicando um arrasto sinistral das unidades geofísicas e litoestratigráficas que representam os complexos Luanga e Luanga Sul, ao longo deste lineamento, ocorrido na terceira fase de deformação e que foi precedido por um movimento destal na segunda fase de deformação, indicado pela geometria desses complexos.

A importância desses gradientes ortogonais é o posicionamento da amplitude do sinal analítico sobre suas fontes causadoras (Nabighian, 1984), ressaltando as bordas do corpo ou feição geológica (Nabighian 1972; Roest et al. 1992; Hsu et al. 1996). A Figura 3.12, mostra a composição do sinal analítico e seu efeito de preservação de bordas.

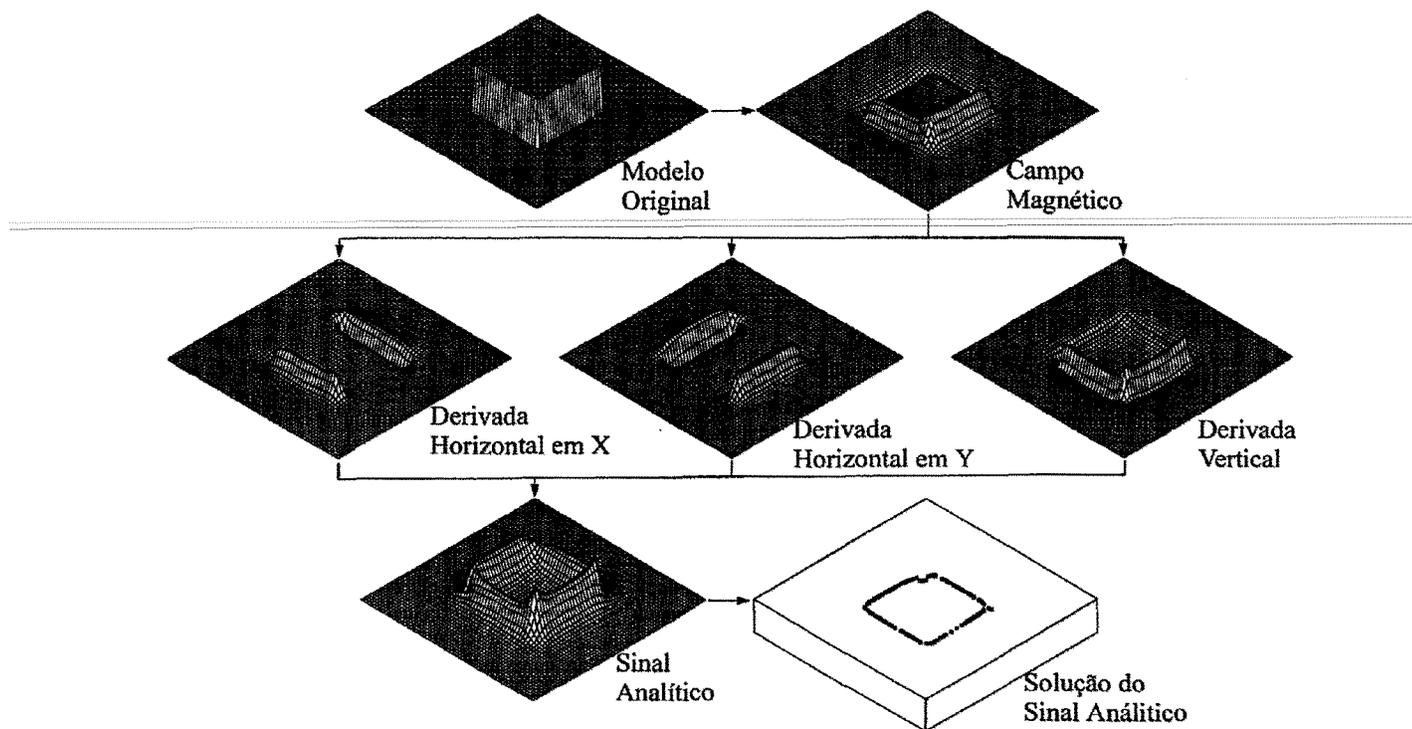


Figura 3.12 - A composição do sinal analítico, a partir da combinação das derivadas horizontais e vertical, gera a amplitude do sinal analítico. Os valores máximos desse sinal podem ser usados para determinar as bordas do corpo e estimar suas profundidades (Roest et al. 1992; Hsu et al. 1996).

Na área da Serra Leste ocorrem vários tipos de rochas contendo magnetita, relacionadas a diferentes unidades litoestratigráficas e processos de formação. Além da magnetita, a pirrotita aparece como fase sulfetada importante nos processos hidrotermais atuantes na área e contribui com o magnetismo das rochas. Entre as unidades onde a magnetita ocorre como fase mineral importante destacam-se: (i) os complexos máfico ultramáficos, cartografados na área como Grupo Rio Novo e

Complexo Máfico Ultramáfico Luanga; (ii) os metassedimentos da Serra do Sereno, na porção extremo noroeste da área, relacionados ao proto minério de manganês; (iii) as brechas hidrotermais relacionadas a intrusões graníticas e, (iv) os diques de gabro Neoproterozóicos de direção N-S. Em todos os casos, a presença de anomalias magnéticas está relacionada à ocorrência de bens minerais, como resultado, por exemplo, da paragênese hidrotermal, rica em magnetita, dos depósitos de Cu – Au da província de Carajás; do sulfeto (pirrotita) que acompanha a mineralização de EGP (Elementos do Grupo da Platina) nos complexos máfico ultramáficos; do conteúdo de magnetita nos depósitos de ferro e manganês. Desta forma, é importante conhecer o comportamento do magnetismo na área e, através de realces, destacar os diferentes domínios magnéticos. A imagem da amplitude do sinal analítico mostra diferentes domínios magnéticos, ressaltando bordas e contatos (Figura 3.13).

3.3.2.6 - A Fase do Sinal Analítico

Números complexos podem ser representados no plano complexo. Nesse plano, as abcissas representam a parte real e, as ordenadas, a parte imaginária. Um número complexo $z = x + iy$ representado nesse plano corresponderá a um ponto com abcissa x e ordenada y . Unindo-se esse ponto à origem do plano teremos o *valor absoluto de z*. O ângulo formado entre esse valor e as abcissas é chamado de fase, que pode ser expressa por $\theta = \arctan(y/x)$ (Butkov, 1968). A fase do sinal analítico é dada pela seguinte relação:

$$\Phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(A_n(x, y))}{\text{Re}(A_n(x, y))}\right)$$

onde n é a ordem do sinal analítico, e Im e são, respectivamente, as partes imaginária e real do sinal analítico no domínio de Fourier.

A fase do sinal analítico mostra o contraste local de susceptibilidade magnética, estendendo a teoria do sinal analítico. A Figura 3.14 mostra a imagem, em tons de cinza, da fase do sinal analítico

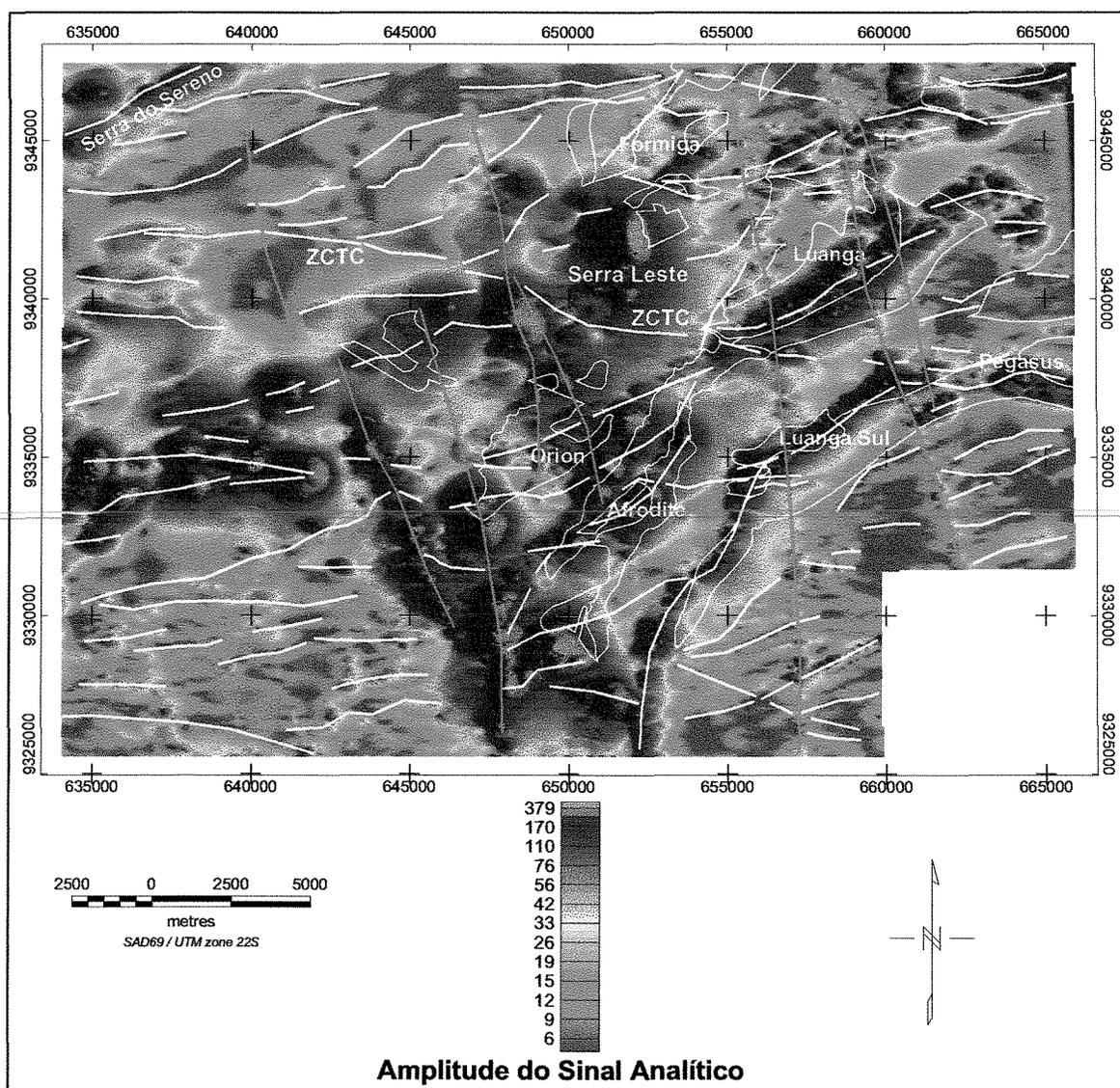


Figura 3.13 - Imagem falsa cor da amplitude do sinal analítico de ordem zero, iluminada de Leste para Oeste, mostrando: a) anomalias NE correlacionadas às unidades ultramáficas dos complexos máfico ultramáficos arqueanos (Luanga, Luanga Sul, Pégasus, Luanga Norte e Formiga; b) Anomalias com formas predominantemente circulares sobas formações ferríferas do depósito de Ferro Serra Leste no centro Norte da área; c) feições discretas orientadas NS a NNW relacionadas à resposta magnética dos diques de gabro com magnetita do Neoproterozóico, destacadas em linhas azuis; d) um conjunto de anomalias de alta frequência e alta amplitude do sinal analítico, na porção central da área correspondente às áreas de afloramento dos complexos máfico ultramáficos Órion e Afrodite. As linhas em branco representam os eixos das anomalias da fase do sinal analítico.

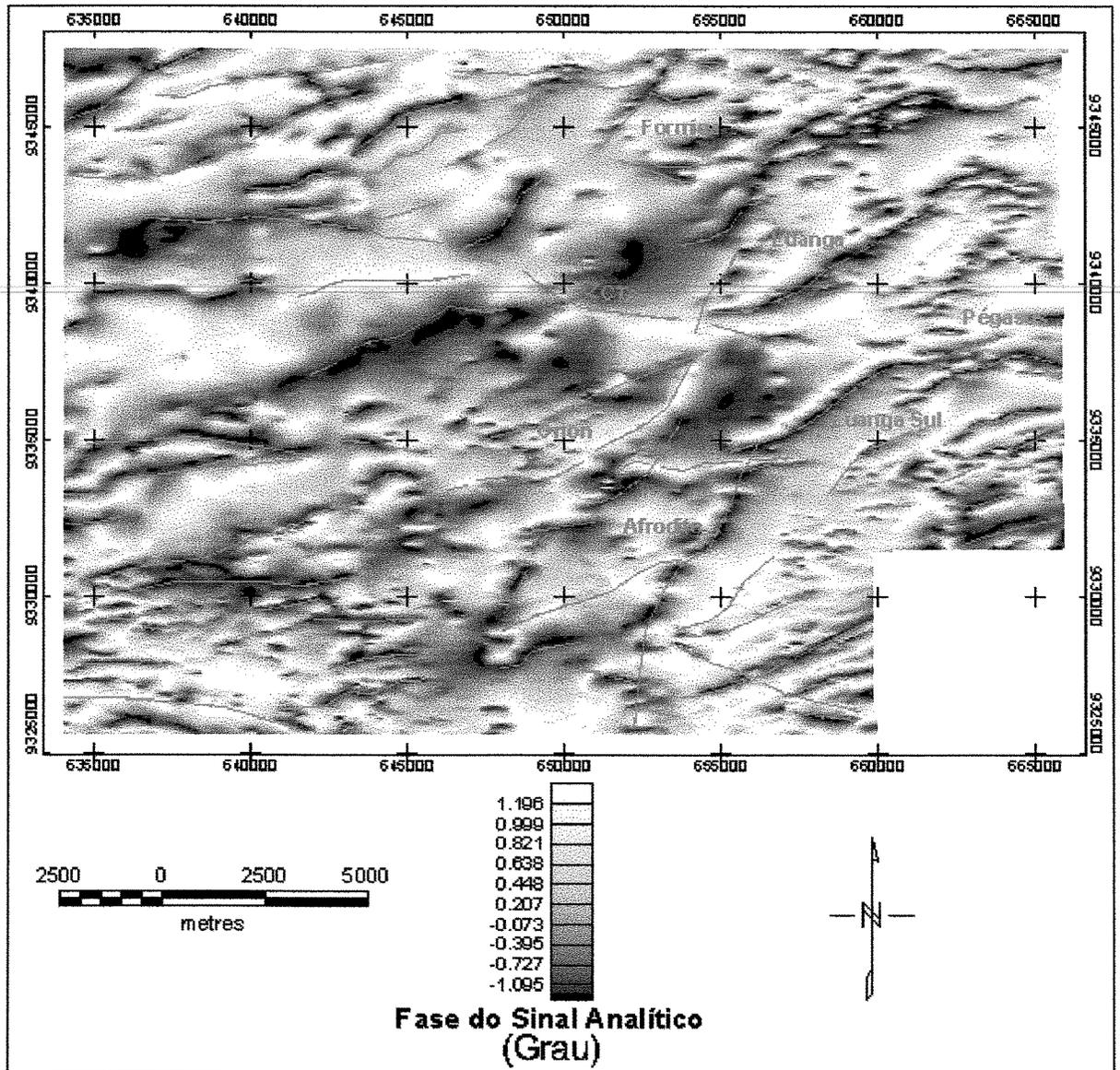


Figura 3.14 - Imagem em tons de cinza, da fase do sinal analítico, ressaltando os eixos do sistema de falhas transcorrentes de direção aproximada E-W, com caráter anastomosado. A Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento (ZCTC), aparece como lineamento WNW, caracterizado pelo truncamento e o arrasto dos eixos ENE.

3.3.2.7 - Deconvolução de Euler

O sistema é baseado na equação de homogeneidade de Euler, uma equação que relaciona o campo magnético ou gravimétrico e suas componentes de gradiente com a localização da fonte. O grau de homogeneidade 'N' pode ser interpretado como índice estrutural (Thompson, 1982) e é a medida da taxa de mudança com a distância do campo. Por exemplo, um corpo magnético estreito, com duas dimensões, como um dique, tem o índice estrutural $N = 1$, enquanto que uma estrutura cilíndrica vertical tem $N = 2$ e uma estrutura esférica tem $N = 3$. O índice estrutural zero é usado para marcar contatos, que podem representar diques, falhas, descontinuidades, etc.

A rotina de deconvolução de *Euler 3D* (Geosoft – Oasis montaj) foi criada para processamento, análise e visualização da inversão tridimensional dos dados de campo potencial (Euler 3D). Essa rotina é baseada no método de janelas quadradas, para cada posição da imagem do campo total ou do campo anômalo e de suas derivadas ortogonais (*malhas*). Uma janela quadrada, dita 10 por 10, percorre cada linha da imagem. Para cada janela, serão calculadas 100 equações (para uma janela 10 X 10), das quais, as quatro variáveis desconhecidas (localização X, Y, Z e um valor de *background* B) e suas incertezas, são obtidas para cada índice estrutural.

As Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19, mostram os mapas de soluções de Euler da área de Serra Leste, usando os índices estruturais: $N = 0$, $N = 0,5$, $N = 1$, $N = 2$ e $N = 3$, respectivamente.

Essas imagens apresentam as soluções com desvio padrão inferior a 5% e indicam profundidades de 100 metros até 1000 metros para as fontes das anomalias magnéticas. É importante ressaltar que a solução da equação de Euler não é afetada pela inclinação, declinação e remanência magnética, já que esses fatores passam a fazer parte da constante da anomalia, em função de um dado modelo. Entretanto, persistem os problemas para representação de feições magnéticas com direção Norte-Sul, em condições de baixas latitudes magnéticas (Geosoft, 2000).

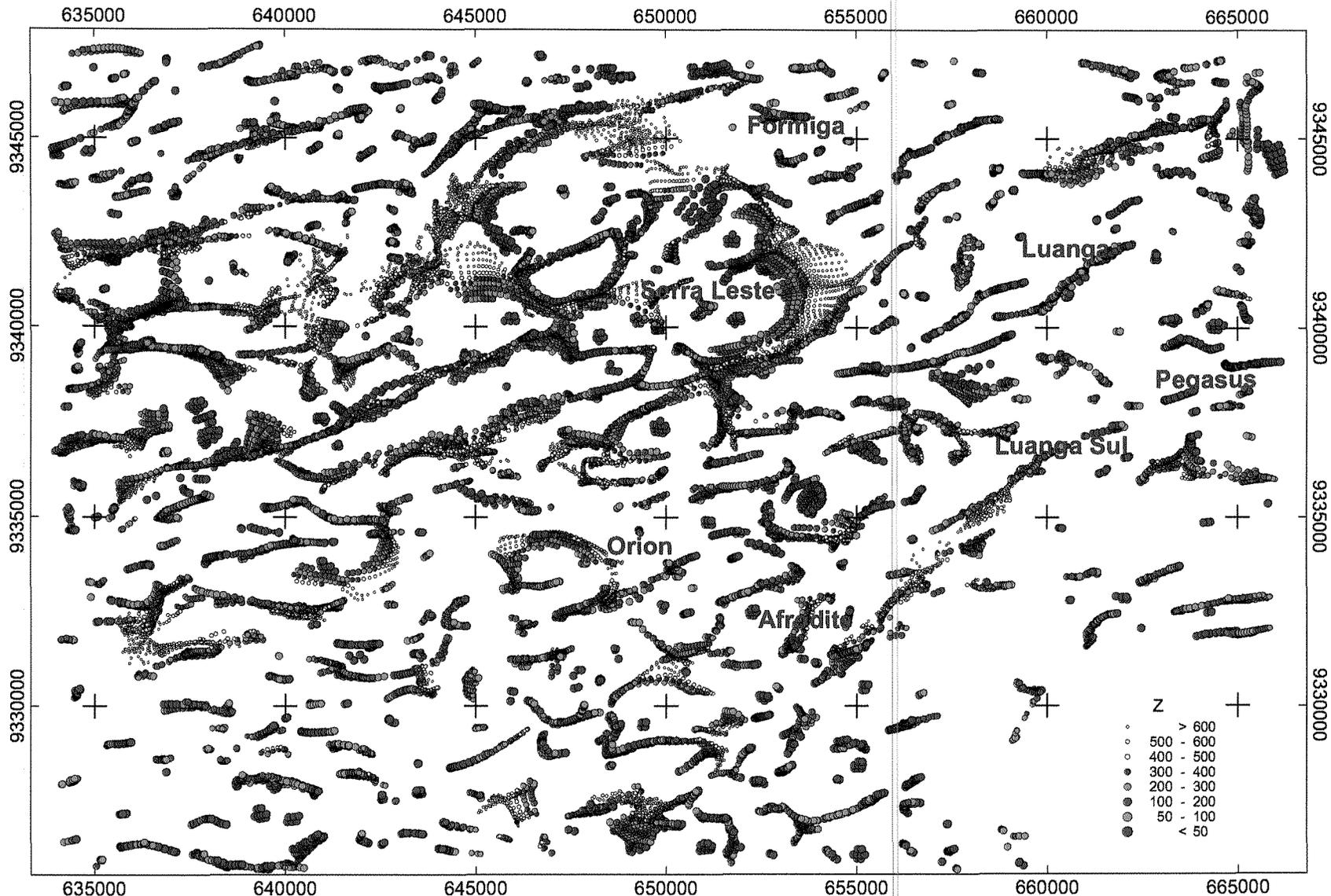


Figura 3.15 - Mapa de Soluções de Euler, índice estrutural zero ($dZ = 0 - 5\%$), mostrando alinhamento preferencial das soluções, segundo a direção NE, na área de ocorrência dos complexos máfico ultramáficos, com profundidades variando de 500 a 400 m. Na área dos depósitos de ferro de Serra Leste as soluções de Euler indicam profundidades maiores que 600 metros, para a fonte das anomalias magnéticas.

2500 0 2500 5000

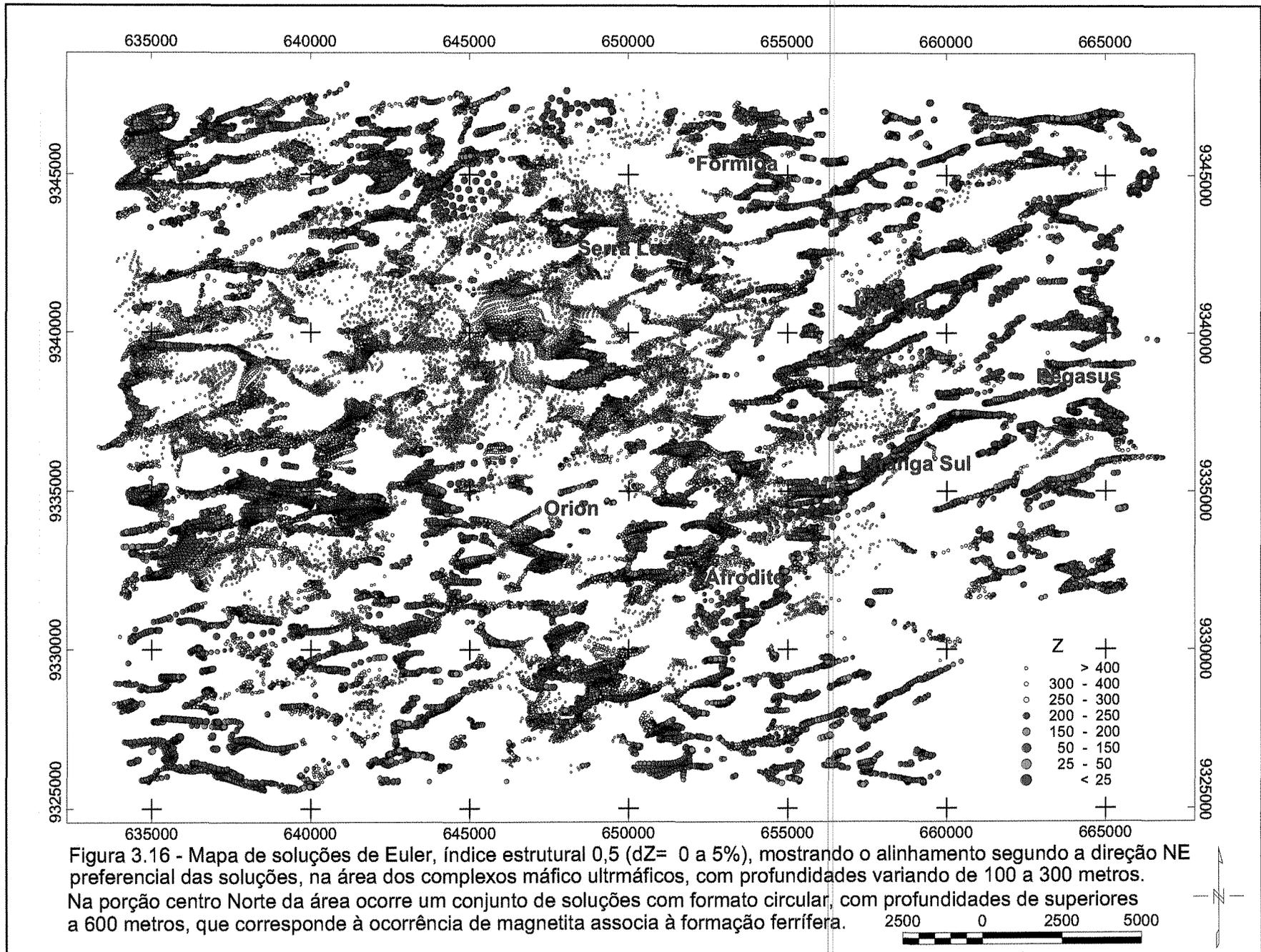


Figura 3.16 - Mapa de soluções de Euler, índice estrutural 0,5 ($dZ = 0$ a 5%), mostrando o alinhamento segundo a direção NE preferencial das soluções, na área dos complexos máfico ultramáficos, com profundidades variando de 100 a 300 metros. Na porção centro Norte da área ocorre um conjunto de soluções com formato circular, com profundidades de superiores a 600 metros, que corresponde à ocorrência de magnetita associada à formação ferrífera.

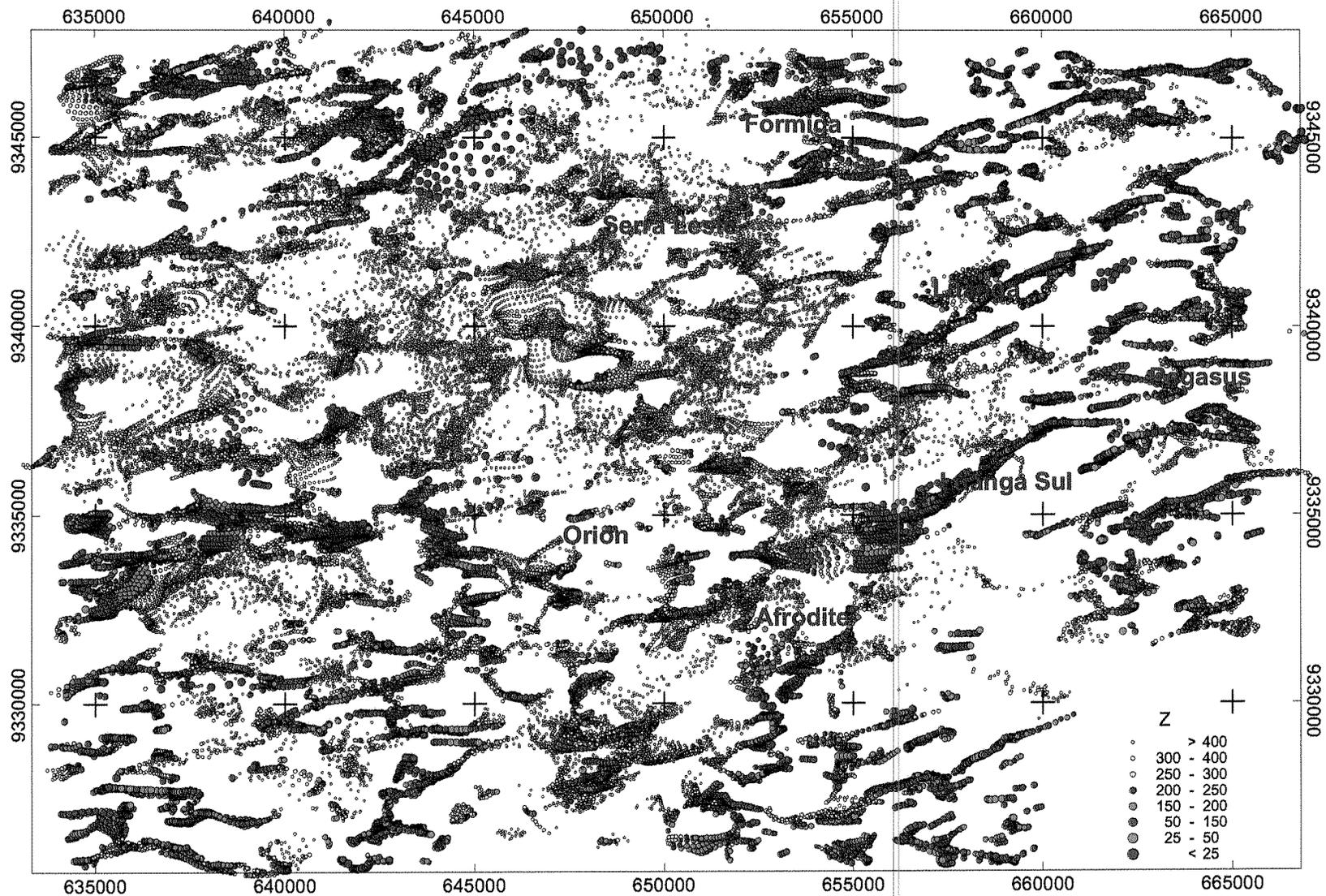


Figura 3.17 - Mapa de Soluções de Euler, índice estrutural 1 ($dZ = 0 - 5\%$), mostrando alinhamento preferencial das soluções, segundo a direção NE, com soluções apresentadas em conjuntos mais espessos, mostrando um gradiente lateral de profundidade, que varia de 25 a 400 metros.

2500 0 2500 5000
metres



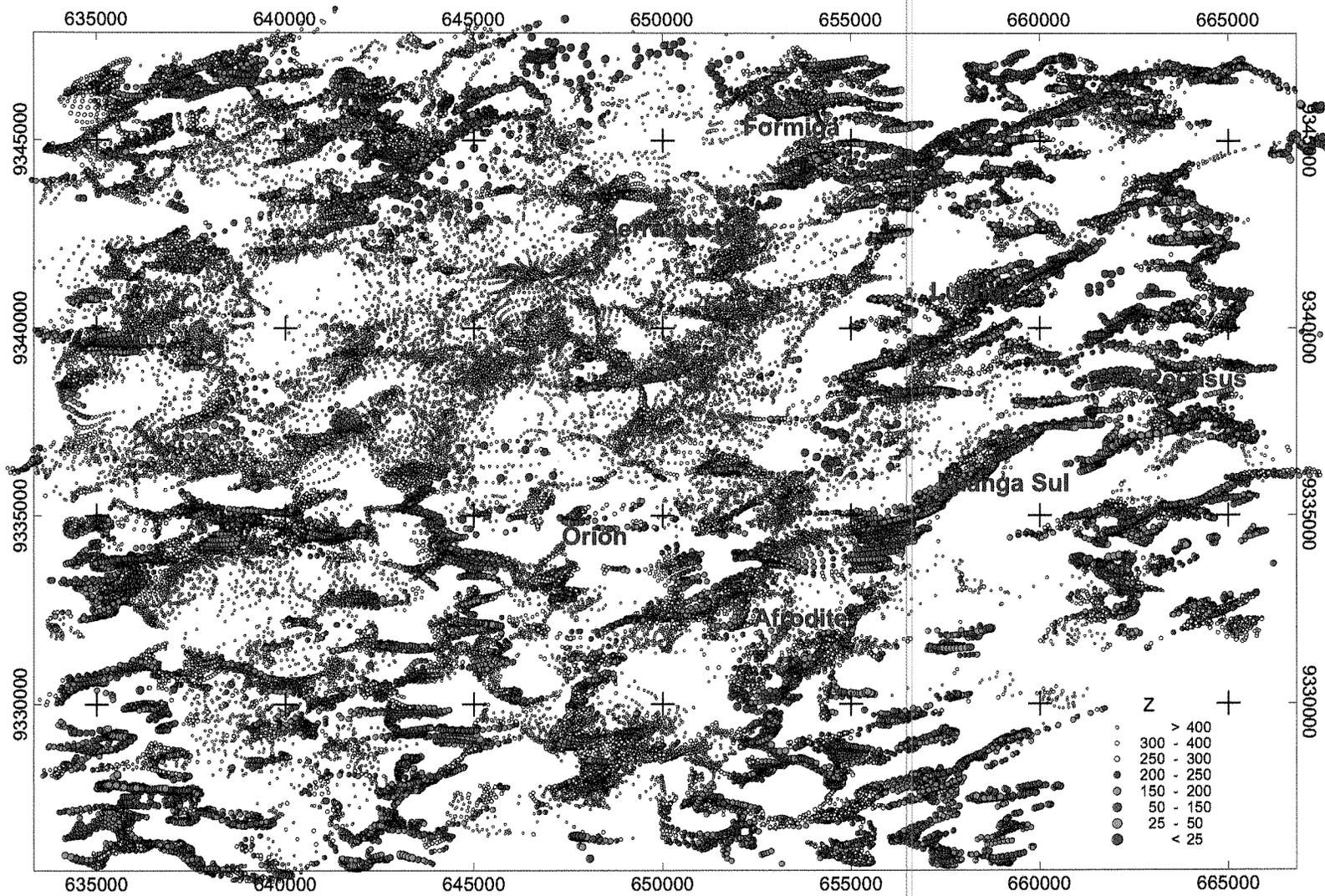


Figura 3.18 - Mapa de soluções de Euler com índice estrutural 2 ($dZ = 0$ a 5%), que modela corpos com formas cilíndricas, mostra anomalias com profundidades em torno de 600 metros nos depósitos de ferro de Serra Leste, na porção centro Norte da área.

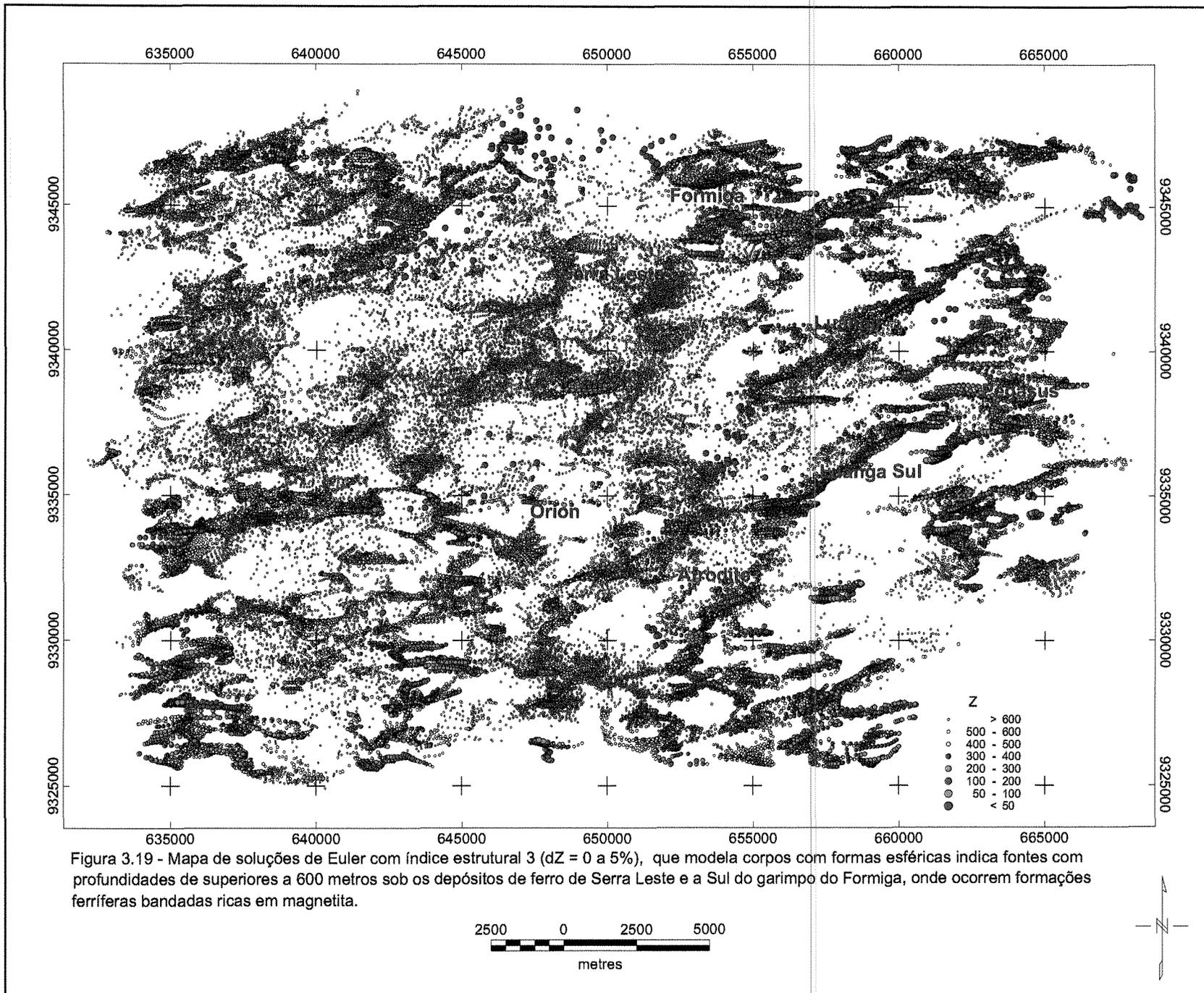


Figura 3.19 - Mapa de soluções de Euler com índice estrutural 3 ($dZ = 0$ a 5%), que modela corpos com formas esféricas indica fontes com profundidades de superiores a 600 metros sob os depósitos de ferro de Serra Leste e a Sul do garimpo do Formiga, onde ocorrem formações ferríferas bandadas ricas em magnetita.

3.3.3 – Realce dos Dados Gamaespectrométricos

A análise da qualidade dos dados radiométricos seguiu o mesmo padrão efetuado para os dados magnéticos. Os canais de potássio (K), urânio(U), tório (Th) e contagem total da radiação gama (CT) foram micronivelados, utilizando-se a técnica de Minty (1991). Os melhores resultados mostraram alguns traços de ruídos, que foram removidos através da aplicação de um filtro de média móvel, com janela de 3 X 3, do tipo Hanning (Figura 3.20).

A integração das imagens dos canais da gamaespectrometria com o modelo digital de elevação, elaborado a partir da carta topográfica na escala 1:100.000, mostra que não existe uma grande influência do relevo sobre a distribuição dos elementos K, U e Th (Figura 3.21). Quando comparados com o mapa geológico da Figura 2.3, observa-se que a distribuição espacial do potássio, do urânio e principalmente do tório, está diretamente relacionada à distribuição das unidades litológicas, diferente de outras áreas de clima tropical, onde a distribuição desses elementos é extremamente influenciada pelo processo de intemperismo, que modela o relevo.

As imagens coloridas microniveladas da contagem total da radiação gama, dos canais do potássio, do urânio e do tório da gamaespectrometria, são apresentadas nas figuras 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25, respectivamente.

A composição colorida consiste de uma técnica básica de realce digital que combina três bandas ou três imagens derivadas quaisquer, com as três cores primárias R (red), G (green) e B (blue). A cada uma das bandas é destinada livremente uma das cores R, G, B. A reconstituição da cor dos objetos presentes em uma imagem é obtida desta forma, por um processo aditivo de cor, onde a soma das três cores primárias resulta no branco e, as combinações em pares, nas cores ciano (azul + verde), magenta (azul + vermelho) e amarelo (vermelho + verde). A percentagem de cada cor primária na imagem final indica a contribuição de cada uma das bandas na cena observada. A

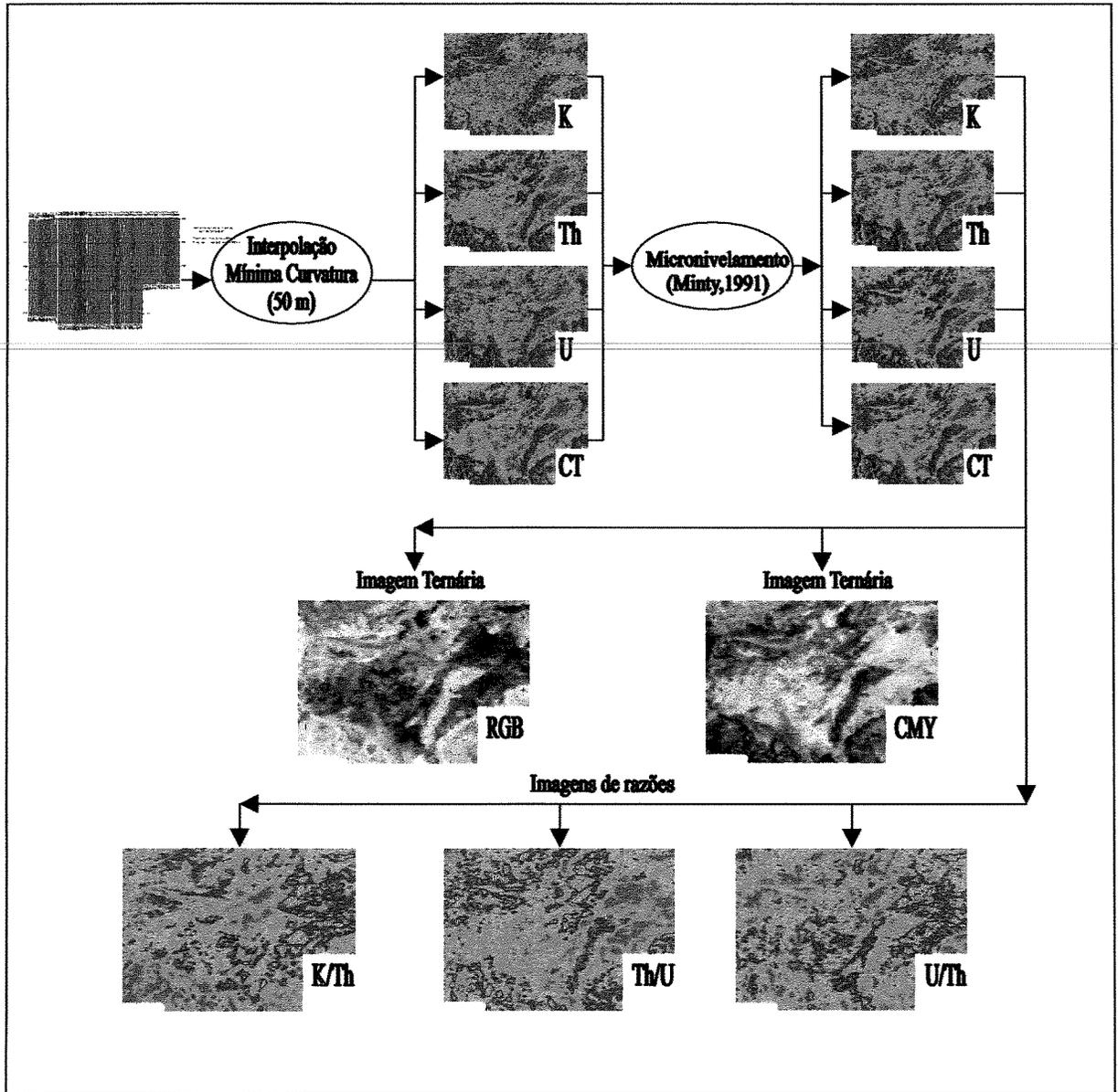


Figura 3.20 - Método utilizado no processamento dos dados gamaespectrométricos.

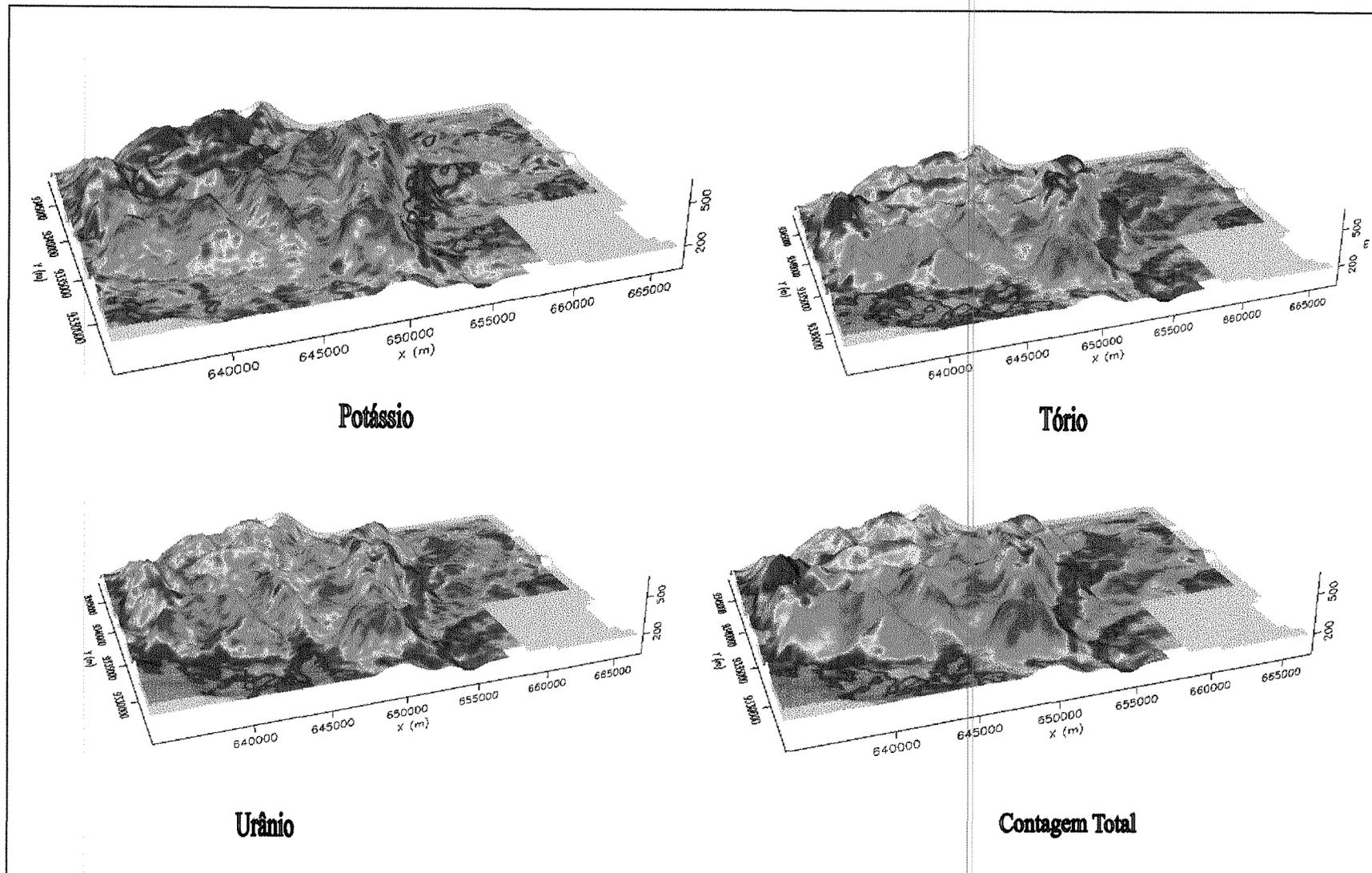


Figura 3.21 - As imagens coloridas dos canais da gamaespectrometria, sobrepostas ao modelo digital de elevação, mostram que os domínios gamaespectrométricos estão relacionados com as unidades geológicas e não apresentam influência determinante do relevo.

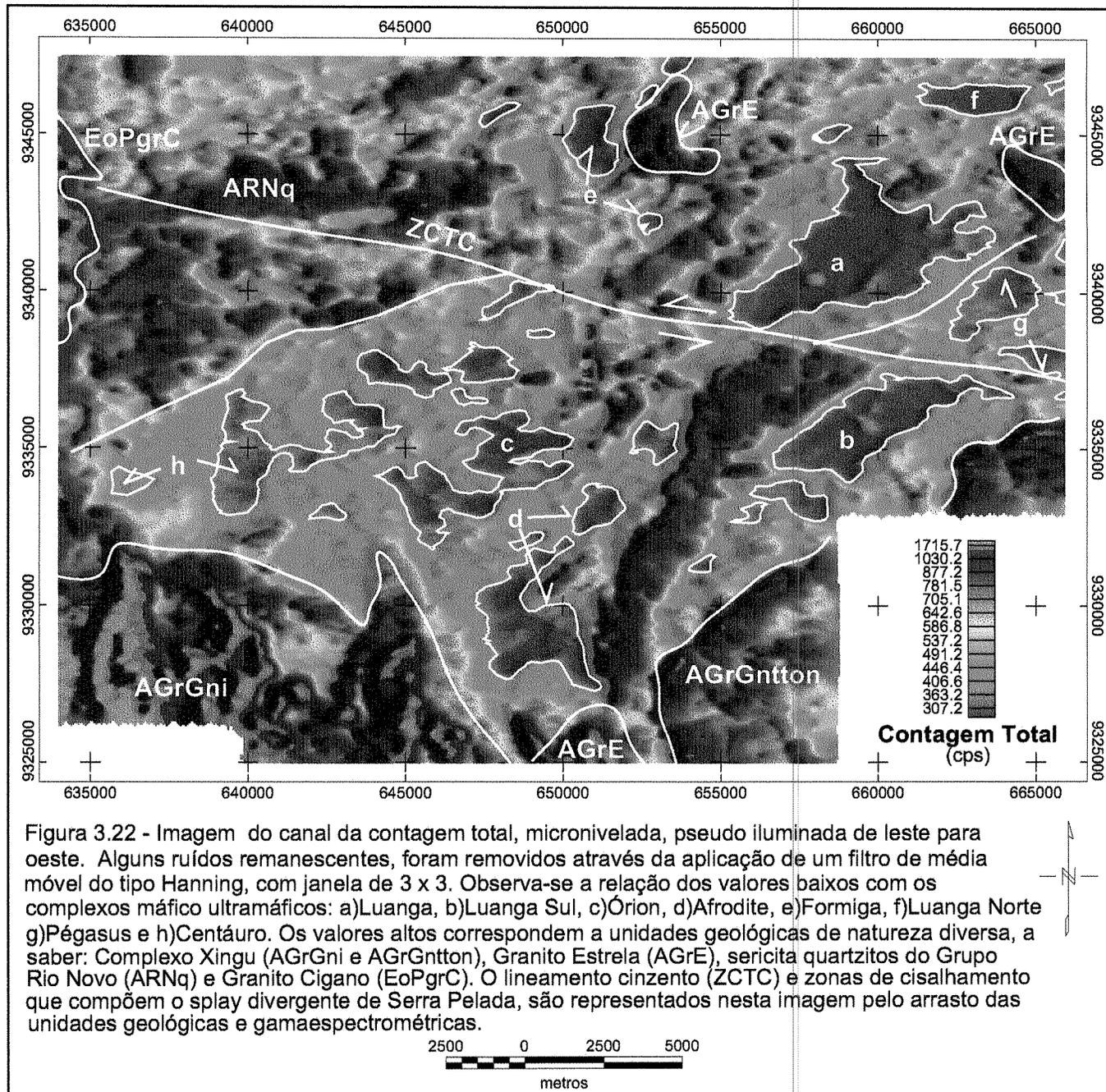


Figura 3.22 - Imagem do canal da contagem total, micronivelada, pseudo iluminada de leste para oeste. Alguns ruídos remanescentes, foram removidos através da aplicação de um filtro de média móvel do tipo Hanning, com janela de 3 x 3. Observa-se a relação dos valores baixos com os complexos máfico ultramáficos: a)Luanga, b)Luanga Sul, c)Órion, d)Afrodite, e)Formiga, f)Luanga Norte g)Pégasus e h)Centáuro. Os valores altos correspondem a unidades geológicas de natureza diversa, a saber: Complexo Xingu (AGrGni e AGrGntton), Granito Estrela (AGrE), sericita quartzitos do Grupo Rio Novo (ARNq) e Granito Cigano (EoPgrC). O lineamento cinzento (ZCTC) e zonas de cisalhamento que compõem o splay divergente de Serra Pelada, são representados nesta imagem pelo arrasto das unidades geológicas e gamaespectrométricas.

2500 0 2500 5000
metros

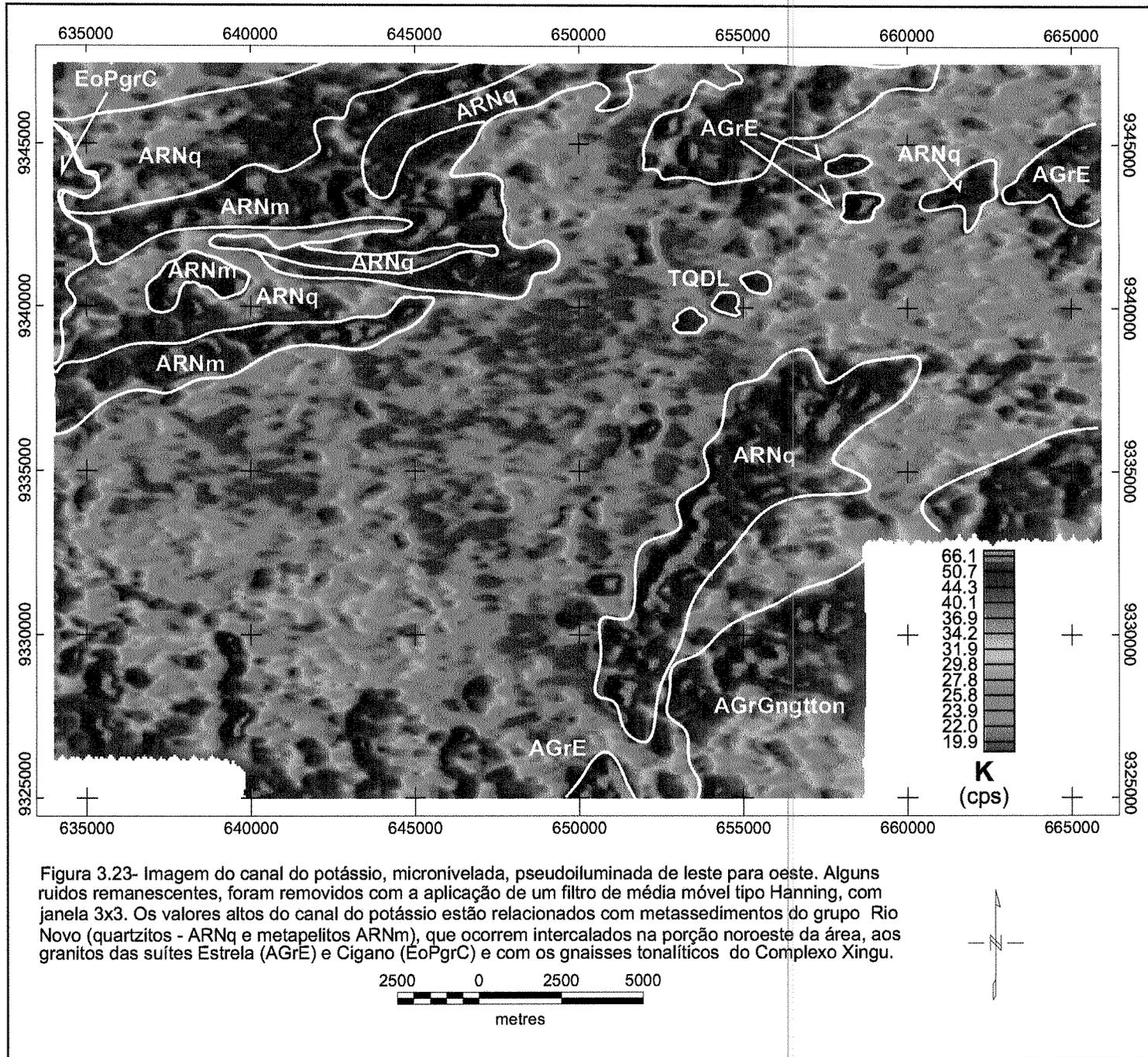


Figura 3.23- Imagem do canal do potássio, micronivelada, pseudoiluminada de leste para oeste. Alguns ruídos remanescentes, foram removidos com a aplicação de um filtro de média móvel tipo Hanning, com janela 3x3. Os valores altos do canal do potássio estão relacionados com metassedimentos do grupo Rio Novo (quartzitos - ARNq e metapelitos ARNm), que ocorrem intercalados na porção noroeste da área, aos granitos das suítes Estrela (AGrE) e Cigano (EoPgrC) e com os gnaisses tonalíticos do Complexo Xingu.

2500 0 2500 5000
metres

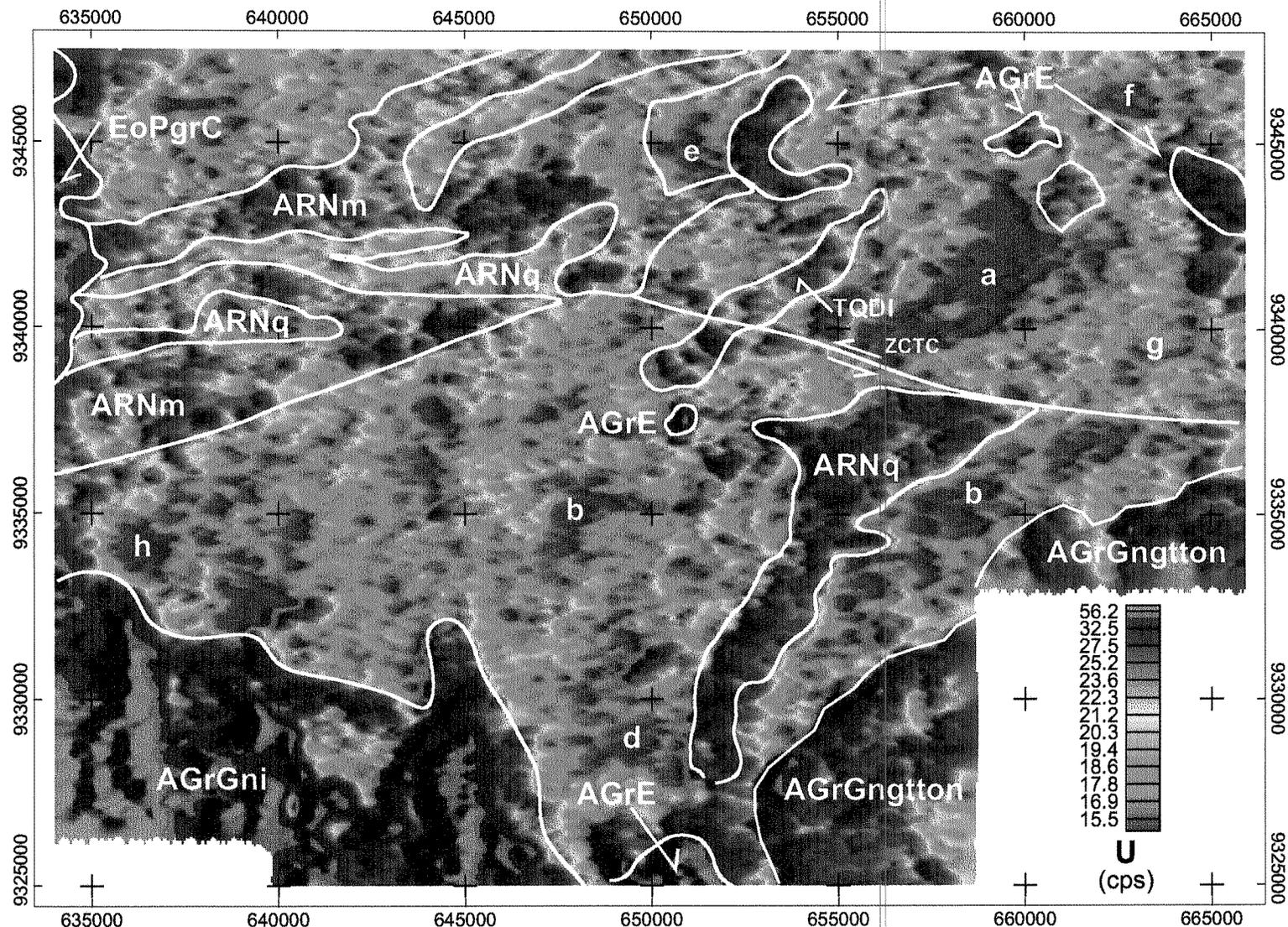


Figura 3.24 - Imagem do canal do urânio, micronivelada, pseudo iluminada de leste para oeste. Os ruídos remanescentes foram removidos com a aplicação de um filtro de média móvel tipo Hanning, com janela 3x3. Os valores mais altos do canal do urânio ocorrem nas áreas de afloramento dos granitos da suíte Estrela (AGrE) e do granito Cigano (EoPgrC) e nas porções SW e SE da área relacionados à resposta dos granitos e gnaisses do Complexo Xingu. Valores intermediários representam a resposta dos quartzitos e metapelitos do Grupo Rio Novo (ARNq e ARNm) e das coberturas lateríticas do depósito de ferro Serra Leste (TQDI). Os complexos máficos e ultramáficos a)Luanga, b)Luanga Sul, c)Órion, d)Afrodite, e)Formiga, f)Luanga Norte, g)Pégasus e h)Centáuro, são representados por valores baixos. A porção oriental do lineamento Cinzento é destacada nesta imagem.

2500 0 2500 5000 metros

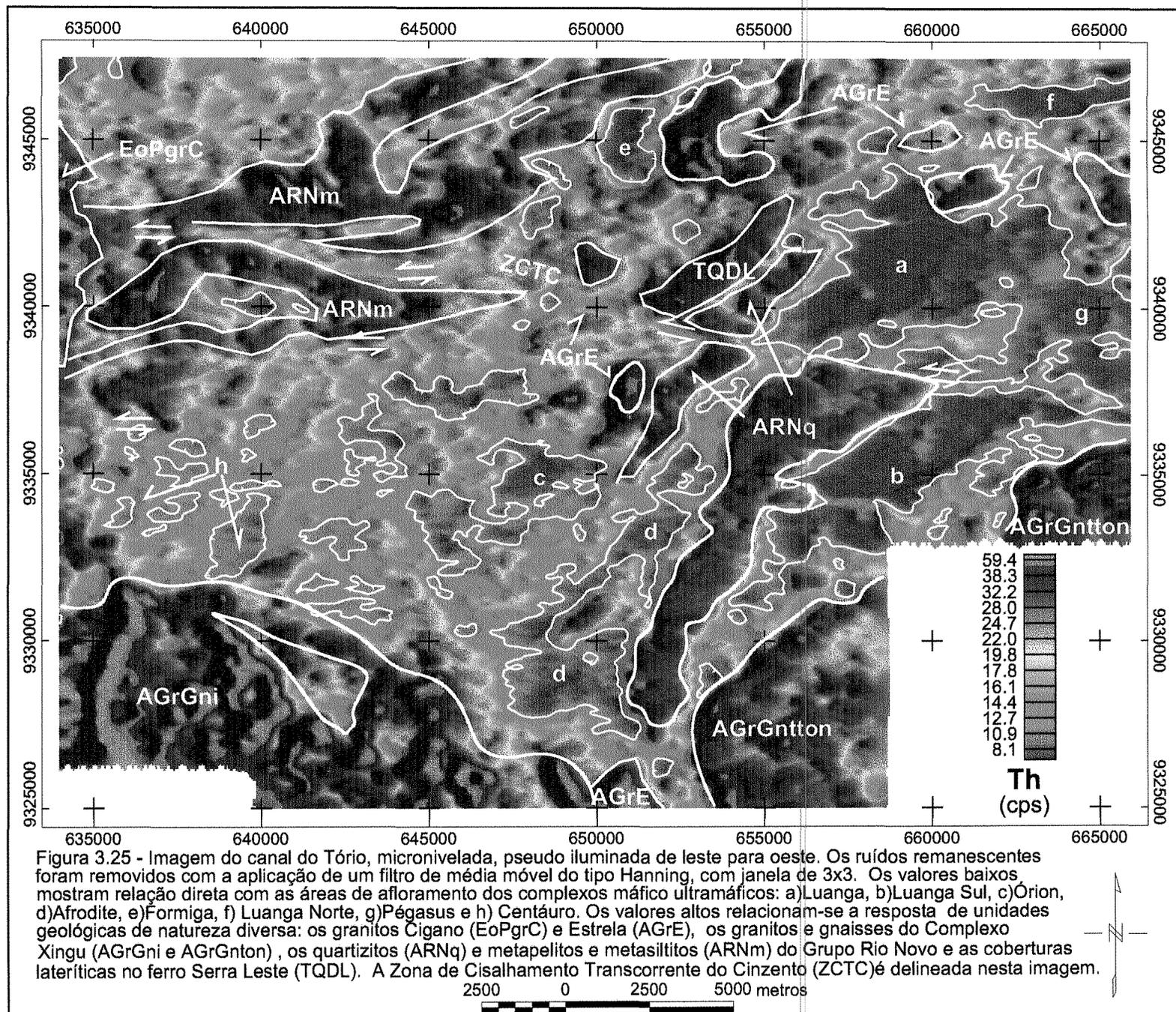


Figura 3.26 ilustra a variação média do conteúdo de K, U e Th, para alguns tipos de rochas, com o acréscimo de SiO₂ (Blum, 1999). Neste trabalho, os canais de K, Th e U foram atribuídos ao vermelho, verde e azul, respectivamente (Figura 3.27). É usual representar o K no vermelho, o Th no verde e o U no azul, pois, geralmente, o canal do urânio contém uma baixa razão sinal/ruído. Associando o canal do U com a cor azul, minimiza-se o efeito visual do ruído na composição ternária (Milligan & Gunn, 1997).

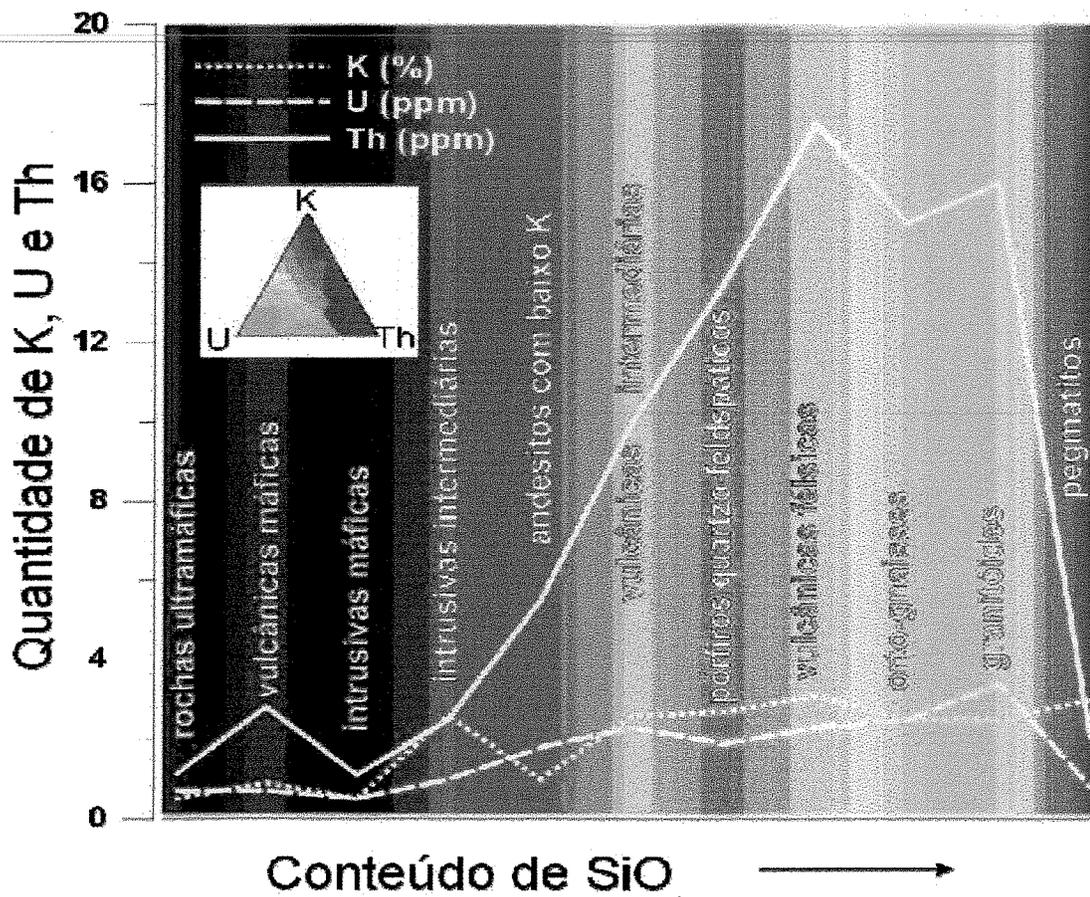


Figura 3.26 – Diagrama mostrando a variação pela média do conteúdo de K, U e Th, para alguns tipos de rochas, com o acréscimo do SiO₂ na composição modal (Blum, 1999).

Através dos mapas de razões, busca-se o realce de áreas com enriquecimento relativo em potássio e urânio. O enriquecimento em potássio pode estar relacionado a intrusões graníticas ou à

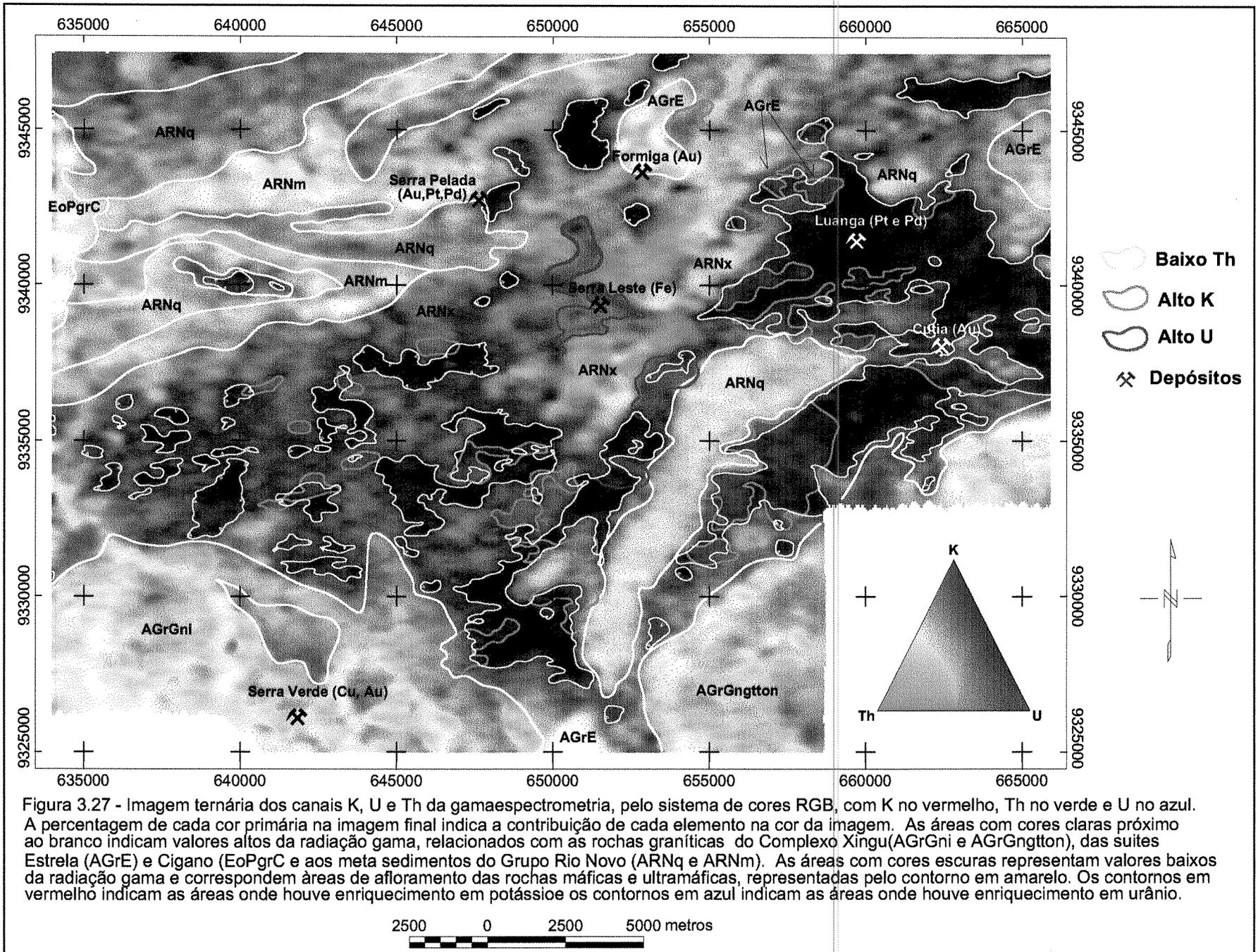


Figura 3.27 - Imagem ternária dos canais K, U e Th da gamaespectrometria, pelo sistema de cores RGB, com K no vermelho, Th no verde e U no azul. A percentagem de cada cor primária na imagem final indica a contribuição de cada elemento na cor da imagem. As áreas com cores claras próximo ao branco indicam valores altos da radiação gama, relacionados com as rochas graníticas do Complexo Xingu (AGrGni e AGrGngton), das suites Estrela (AGrE) e Cigano (EoPgrC) e aos meta sedimentos do Grupo Rio Novo (ARNq e ARNm). As áreas com cores escuras representam valores baixos da radiação gama e correspondem áreas de afloramento das rochas máficas e ultramáficas, representadas pelo contorno em amarelo. Os contornos em vermelho indicam as áreas onde houve enriquecimento em potássio e os contornos em azul indicam as áreas onde houve enriquecimento em urânio.

atividade hidrotermal, importante na geração de vários tipos de depósitos minerais (Gunn & Dentith, 1997, Hitzman et al., 1992; Thompson et al., 1999). Esse tipo de enriquecimento é destacado através do uso das razões U/K e K/Th. Essas razões não apresentaram boa correlação dos valores altos com as áreas de afloramento de rochas graníticas ou hidrotermalizadas conhecidas na área em estudo. Neste trabalho é apresentada a imagem da razão U/Th (Figura 3.28), que mostra uma boa correspondência dos valores altos desta razão, com as áreas de afloramento das rochas que compõem os complexos máfico ultramáficos acamadados, indicando um predomínio do urânio sobre o tório nessas áreas. O lineamento da ZCTC também pode ser observado nesta imagem.

3.3.4 - Realce dos Dados Aeroeletromagnéticos no Domínio do Tempo

Os sistemas eletromagnéticos aereoportados historicamente tem se concentrado na medição da componente horizontal (x) do campo eletromagnético. Os sistemas mais modernos medem duas componentes adicionais, a vertical (z) e a lateral (y), que fornecem uma informação mais diagnóstica da geologia em subsuperfície. Em áreas onde as camadas são aproximadamente horizontais a resposta da componente (z) apresenta uma alta razão sinal/ruído, principalmente nos tempos tardios do decaimento. Isso permite a determinação da condutividade a maiores profundidades. As três componentes podem ser combinadas para dar o envelope de energia da resposta eletromagnética. A forma do envelope de energia é dependente da forma da resposta da componente x, na direção de vôo.

A operação do sistema eletromagnético envolve a medida do decaimento do campo eletromagnético secundário induzido no terreno por uma série de pulsos curtos de corrente gerado pelo transmissor acoplado na aeronave. As variações no decaimento do campo secundário, amostradas e mostradas como janelas, são analisadas e interpretadas para fornecer informações geologicamente relevantes.

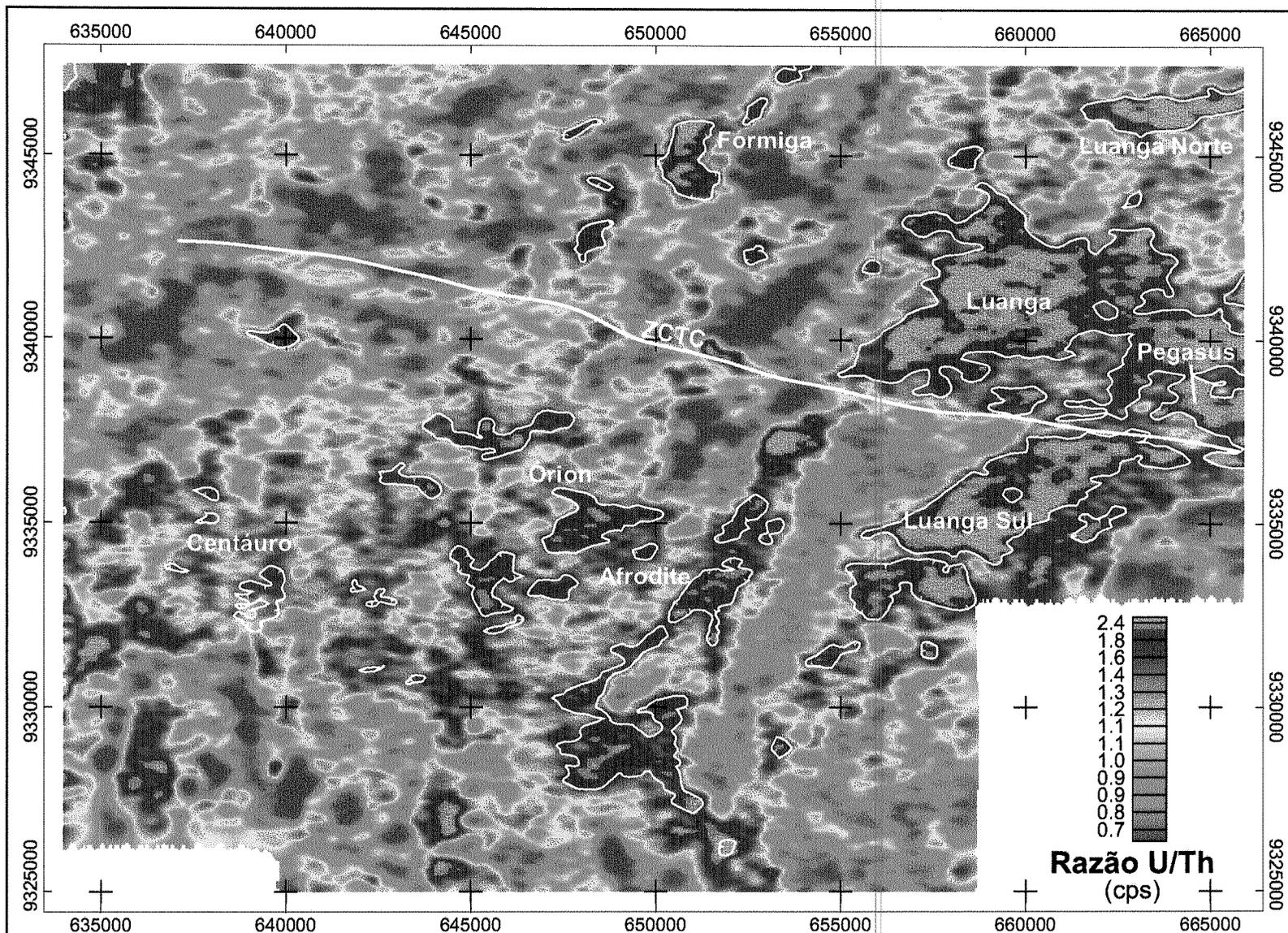


Figura 3.28 - Imagem colorida da razão U/Th, mostrando uma boa correspondência dos valores altos desta razão, com as áreas de afloramento dos complexos máfico ultramáficos acamadados. O lineamento principal da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (ZCTC), pode ser observado nesta imagem.



O campo primário é criado por uma série de pulsos de corrente gerados em uma bobina com três a seis voltas contornando a aeronave, fixos no nariz, na cauda e na ponta das asas da aeronave. A frequência pode ser selecionada: 25, 30, 75, 90, 125, 150, 225 e 270 Hz. A largura do pulso pode ser definida de acordo com os alvos. As janelas de pulso disponíveis, em geral, são: 0.6, 1.0, 2.0 e 4.0 milissegundos. O tempo disponível sem corrente (*off-time*) pode ser configurado como maior do que 16 milissegundos. A corrente depende da largura do pulso, mas o momento do dipolo pode ser maior que $6,7 \times 10^5 \text{ Am}^2$.

O princípio de amostragem do campo secundário induzido na ausência do campo primário (durante um intervalo de tempo), proporciona uma excelente razão sinal/ruído e um acréscimo na profundidade de penetração, quando comparado com sistemas eletromagnéticos de ondas contínuas no domínio da frequência. Os limites de profundidade de investigação estão a 350 metros para um corpo de grandes dimensões e condutor vertical, 550 metros para uma camada estreita subhorizontal e 400 metros para um meio condutor homogêneo.

Na interpretação de condutores discretos, os dados da componente (z) podem ser utilizados para a caracterização da profundidade e do mergulho do condutor, bem como na identificação de condutores localizados entre as linhas de vôo ou além dos limites do levantamento (Smith & Keating, 1996).

Os dados do sistema GEOTEM em estudo (com três bobinas nas direções x, y e z), apresentam registro de 20 canais para cada bobina. Não foi efetuado um tratamento de dados exaustivo para estes dados, visto que os mesmos foram entregues com elevado grau de processamento, incluindo o cálculo da condutância aparente e da seleção de anomalias através da condutância computada como “*conductivity thickness product*” – CTP (apresentada em Siemens). A condutância aparente é calculada usando a forma da onda eletromagnética, utilizando os 20 canais dos dados combinados das bobinas nas direções x e y, ajustados para o modelo de uma placa estreita, assumido para o sistema GEOTEM (Figura 3.29). Utilizando o programa PLATE (GEOTERREX-DIGHEM), gera-se uma placa sintética sob condições variadas de profundidade (0,

150 e 300 metros) e mergulho (0° , 45° , 90° e 135°). Os valores calculados são armazenados em milisiemens, com precisão de 3 casas decimais. A seleção das anomalias é feita através do ajuste da bobina na direção x nos canais de 9 a 20, para um modelo de uma placa vertical, de forma a extrair a condutância e a profundidade da fonte. As posições centrais das anomalias derivam dos picos positivos e negativos da onda eletromagnética. A seleção inicial das anomalias é feita interativamente, através da análise dos dados em forma de perfis, quando todas as possíveis respostas, acima do ruído geral, são consideradas anomalias e estocadas em um banco de dados que contém os canais CTP e DEP (profundidade relativa da fonte em relação à superfície).

Neste trabalho, optou-se pela representação do canal 18 na direção Z, apresentado em ppm (partes por milhão do campo magnético primário induzido), que representa o campo eletromagnético ortogonal à direção do terreno, em profundidades acima de 250 metros de profundidade. O objetivo foi o de investigar os níveis mais profundos, sem interferência do manto de intemperismo (Figura 3.3). Para a elaboração da imagem foi utilizada uma célula de 50 metros, a qual foi micronivelada, seguindo as premissas apresentadas anteriormente. Ainda assim, ruídos remanescentes são notados na imagem (Figura 3.30).

A imagem do canal de condutância aparente representada em milisiemens x 1000 (Figura 3.31), mostra zonas condutivas coincidentes com os complexos máfico ultramáficos Luanga e Luanga Sul, que pode ser relacionada à resposta das rochas ultramáficas ricas em magnetita (Figura 3.32). Além disso, essa imagem aponta a presença de uma zona condutiva entre os garimpos do Formiga e de Serra Pelada, que pode ser relacionada a dois fatores principais: devido a ocorrência de rochas ultramáficas e formações ferríferas; e devido ao intemperismo, representado por um manto com espessura de até 400 metros na área do depósito Serra Pelada. Na porção central da área ocorrem anomalias irregulares da condutância aparente, relacionadas com a cobertura condutiva no domínio de rochas máficas do Grupo Rio Novo (Figura 2.3).

Nomogram

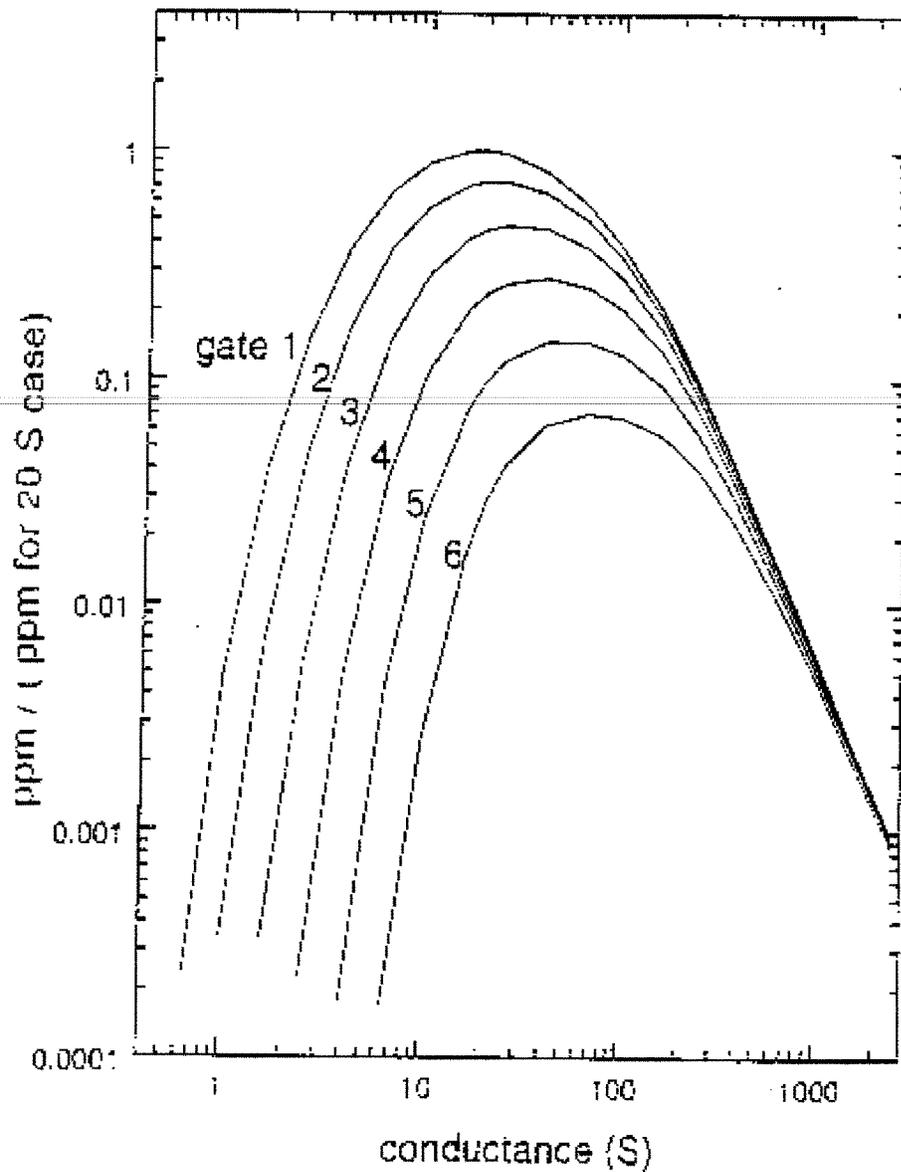


Figura 3.29 - Nomograma mostrando a geometria assumida para o sistema GEOTEM, para o caso de um condutor com comprimento de 600 m e 300 m de espessura, com condutância igual a 20 Siemens, utilizado para o cálculo da condutância aparente.

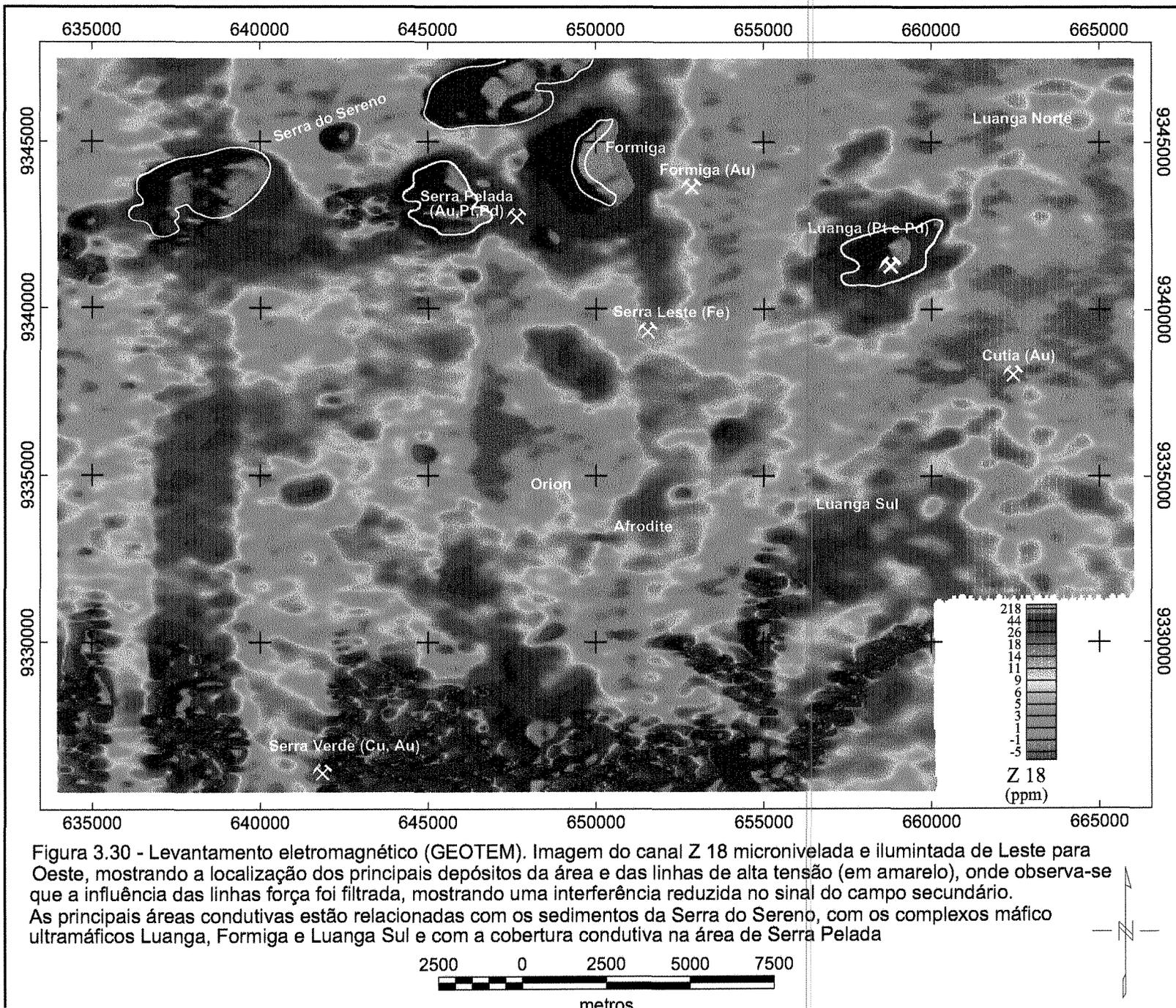
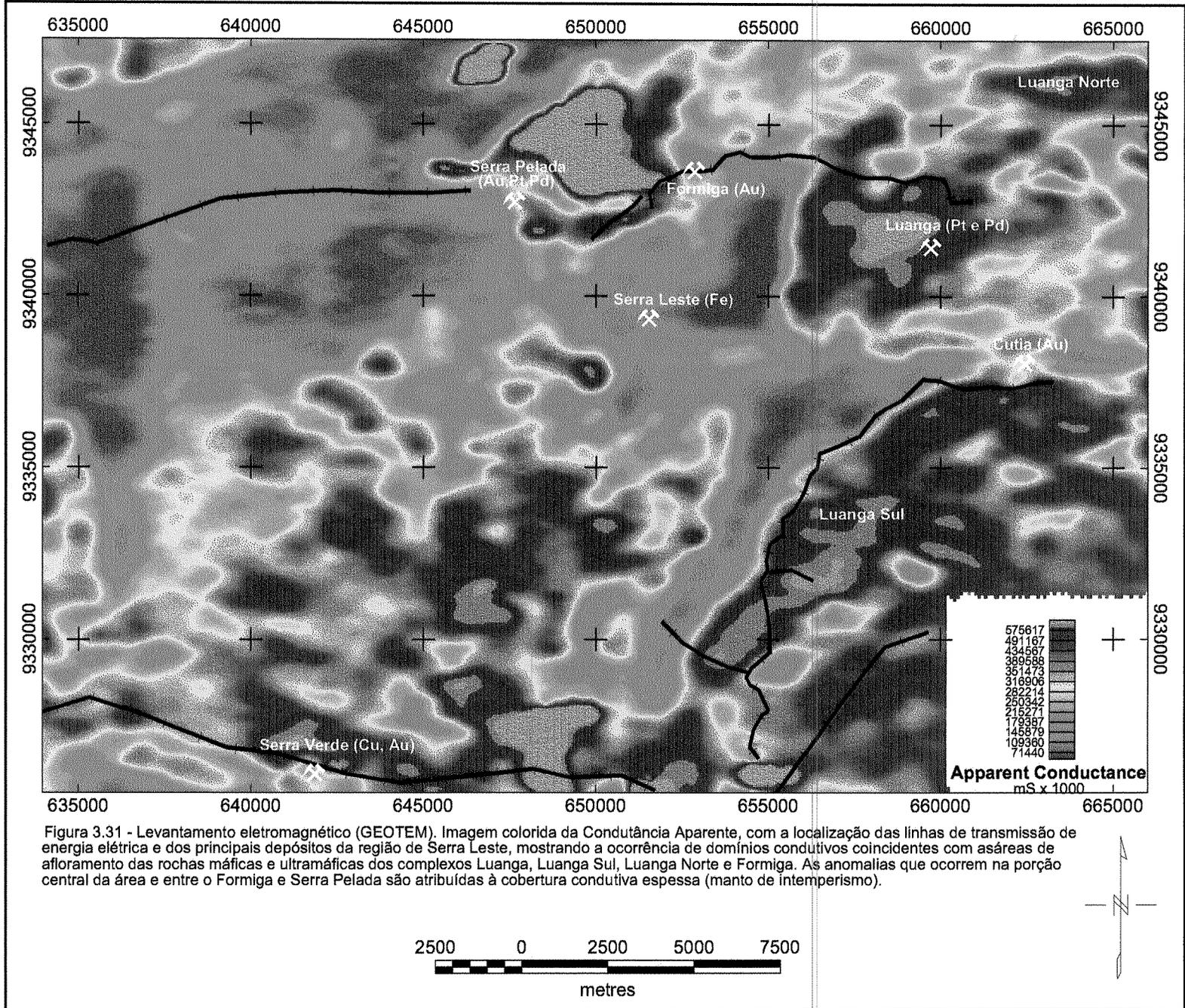


Figura 3.30 - Levantamento eletromagnético (GEOTEM). Imagem do canal Z 18 micronivelada e iluminada de Leste para Oeste, mostrando a localização dos principais depósitos da área e das linhas de alta tensão (em amarelo), onde observa-se que a influência das linhas força foi filtrada, mostrando uma interferência reduzida no sinal do campo secundário. As principais áreas condutivas estão relacionadas com os sedimentos da Serra do Sereno, com os complexos máfico ultramáficos Luanga, Formiga e Luanga Sul e com a cobertura condutiva na área de Serra Pelada



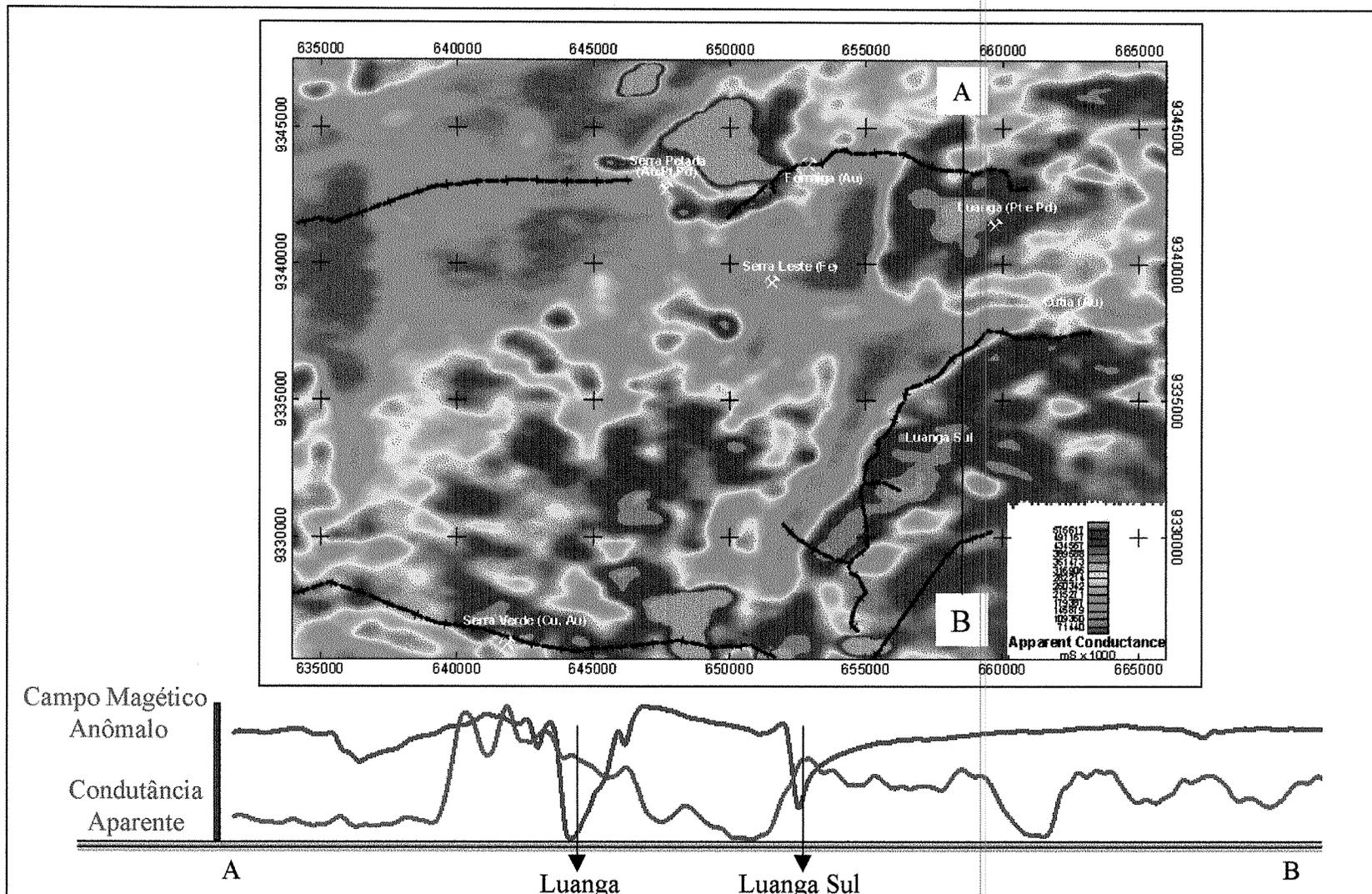


Figura 3.32 - Mapa da condutância aparente mostrando o perfil A-B, que compara a variação da condutância aparente calculada com o campo magnético anômalo. Destaca-se a correlação da condutância aparente com as rochas ultramáficas magnéticas dos complexos Luanga e Luanga Sul.

A Figura 3.33 apresenta o mapa das soluções de CTP, produzido a partir do modelo de condutor em forma de placa estreita vertical, no programa PLATE. O CTP é um índice que representa os principais condutores, dados pelo produto entre a condutibilidade e a espessura do condutor, filtrando-se as feições mais condutivas e realçando-se as feições discretas que obedecem o modelo estabelecido. Esta figura mostra valores anômalos para regiões de alto CTP (>28.35) e médio CTP (19.78 – 28.35). Esses intervalos foram definidos com base na estatística básica do canal CTP do banco de dados, utilizando a média mais o desvio padrão para a definição dos intervalos. Nota-se que, de certa forma, os principais conjuntos de soluções correspondem às principais feições observadas nas imagens da condutância aparente e do canal Z18. Merece destaque o conjunto de soluções alinhadas NE, que ocorre na porção NW da área, que representam a resposta das camadas de filitos carbonosos e manganésíferos do Grupo Rio Novo, compreendidos na Serra do Sereno.

Os métodos de pré-processamento, processamento e realce, aplicados aos dados geofísicos abordados neste projeto, foram bastante efetivos no sentido de gerar produtos interpretáveis geologicamente. A interpretação desses produtos, será discutida no capítulo 5.

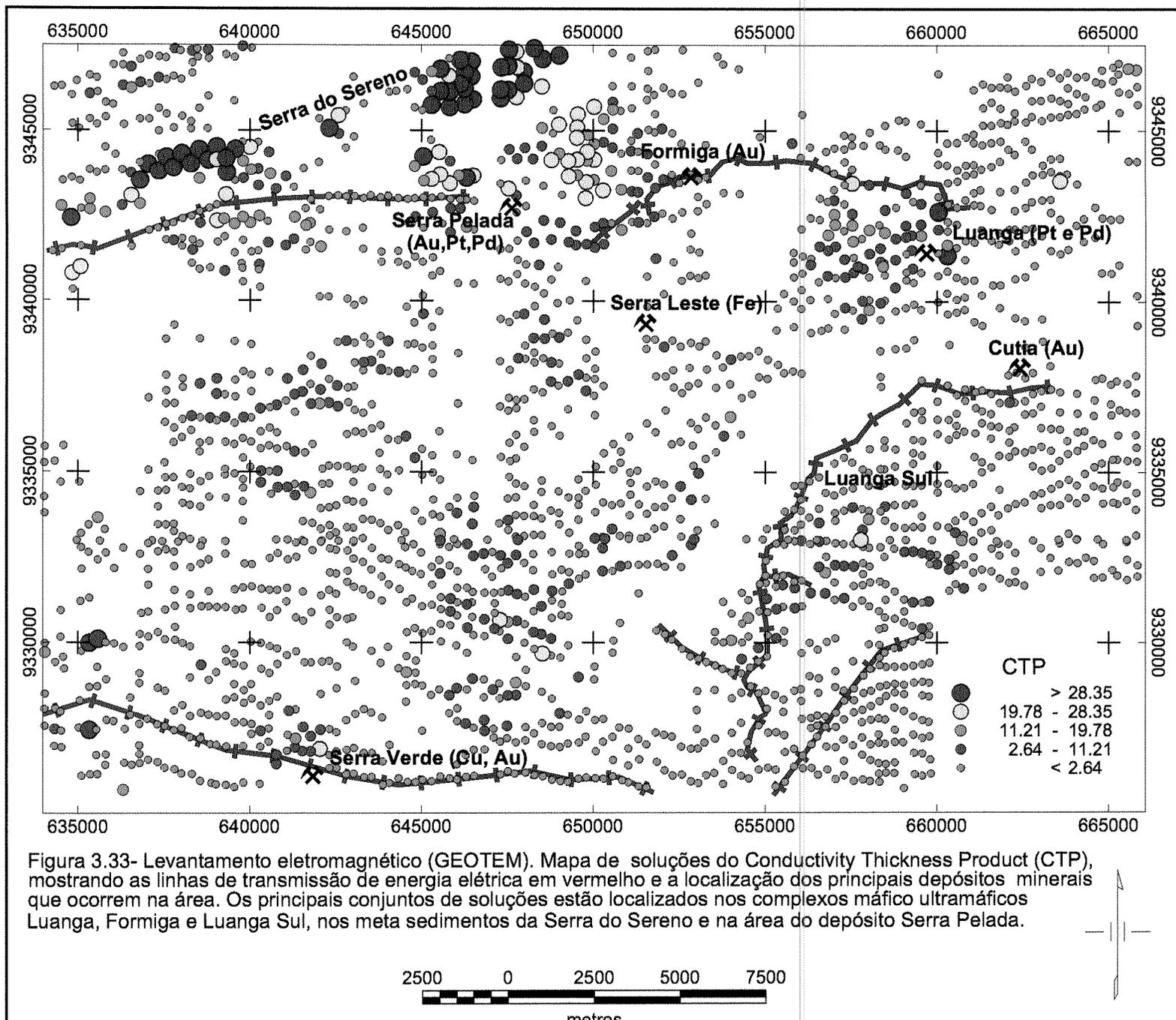


Figura 3.33- Levantamento eletromagnético (GEOTEM). Mapa de soluções do Conductivity Thickness Product (CTP), mostrando as linhas de transmissão de energia elétrica em vermelho e a localização dos principais depósitos minerais que ocorrem na área. Os principais conjuntos de soluções estão localizados nos complexos máfico ultramáficos Luanga, Formiga e Luanga Sul, nos meta sedimentos da Serra do Sereno e na área do depósito Serra Pelada.

CAPÍTULO IV

PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DOS SENSORES LANDSAT-7/ENHANCED THEMATIC MAPPER PLUS (ETM+) E RADARSAT

4.1. Introdução

As imagens de sensores remotos têm sido amplamente utilizadas como suporte ao mapeamento geológico e à exploração mineral. A visão sinóptica proporcionada por esses dados permite a definição da distribuição das unidades litológicas e de seu inter-relacionamento, a identificação das megaestruturas e de elementos diagnósticos de movimentação. Particularmente as imagens dos sensores óticos, como os Thematic Mapper (TM), são também utilizadas para identificar assembléias minerais de alteração hidrotermal, como minerais de ferro e argilo-minerais (Sabins, 1999). As imagens de sensores ativos, como o RADARSAT, destacam-se por sua capacidade de sensoriamento em quaisquer condições de clima e no mapeamento de estruturas, devido ao seu sistema de visada lateral (Paradella et al, 1997).

Neste trabalho foram utilizadas imagens do Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) e do radar orbital de abertura sintética RADARSAT, com o objetivo de extrair informações adicionais sobre a geologia e estruturas da região de Serra Leste.

4.2. Materiais

4.2.1 - Dados do Landsat-7/Enhanced Thematic Mapper Plus

O Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) é um radiômetro de imageamento multiespectral instalado a bordo do satélite Landsat 7, lançado em 15 de abril de 1999. O satélite encontra-se numa órbita heliossíncrona (passagem a ~10:00h na região equatorial), a aproximadamente 705 km da superfície terrestre, com uma inclinação de 98° em relação ao Equador. O sistema de referência do satélite é mantido com ajustes periódicos, feitos através de um

subsistema de estabilização com três eixos, que mantêm os sensores apontados para a Terra, com precisão de 0,05 graus. Cada cena das imagens do ETM+ tem 183 km de largura por 170 km de comprimento.

O sensor ETM+ possui 8 bandas, cobrindo as regiões do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR), do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e do infravermelho termal (TIR). O tamanho do pixel (resolução espacial) deste sensor é de 15 metros na banda pancromática (banda 8), 30 metros nas seis bandas do VIS, NIR e SWIR, e 60 metros na banda do infravermelho termal (Tabela 4.1).

Bandas Espectrais do Landsat-7 ETM+		
Banda	Faixa do espectro (μm)	Resolução espacial (m)
1 (azul)	450 - 515	30
2 (verde)	525 - 605	30
3 (vermelho)	630 - 690	30
4 (infravermelho próximo)	775 - 900	30
5 (infravermelho médio)	1.550 - 1.750	30
6* (infra vermelho termal)	10.40 - 12.50	60
7 (infravermelho médio)	2.090 - 2.350	30
8 (pancromática)	520 - 900	15

Tabela 4.1 – Características das bandas espectrais do Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)
* O espectro compreendido na Banda 6 é, na realidade, sensoriado com uma banda de alto ganho (banda 6.1) e uma banda de baixo ganho (banda 6.2).

O sensor ETM+ do Landsat 7 apresenta algumas vantagens em relação aos seus antecessores. A primeira delas é a adição da banda pancromática com resolução espacial de 15 metros. Nesta série, a banda 6 do termal tem resolução espacial de 60 metros e os dados são adquiridos com duas calibrações de ganho.

As imagens do ETM+ são fornecidas com três níveis distintos de correção: (0R) que não possui correções radiométricas ou geométricas aplicadas; (1R) que inclui correção radiométrica, sem correção geométrica; e (1G) que inclui correção radiométrica e geométrica. Informações

detalhadas sobre sistemas e produtos do sensor ETM+ podem ser obtidas na página do *United States Geological Survey* na internet (<http://landsat7.usgs.gov/>).

Para o recobrimento da área de estudo foram necessárias duas cenas Landsat-7 (Path 223/Row 64 e Path 224/Row 64). A cena 223/64 foi adquirida no dia 29 de julho de 1999 e possui 7200 linhas por 7890 pixels, com oito bandas (1,2,3,4,5,6,1,6.2 e 7) e uma pancromática (banda 8) com 14400 linhas por 15780 pixels. A cena 224/64 foi adquirida no dia 05 de agosto de 1999 e possui 7200 linhas com 7891 pixels, com oito bandas (1,2,3,4,5,6,1,6.2 e 7) e uma pancromática com 14701 linhas por 15782 pixels. Essas imagens foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, no formato TIF.

4.2.2 - Dados do RADARSAT

O RADARSAT, lançado em 4 de novembro de 1995, foi o resultado de um consórcio entre o governo canadense, a indústria privada e a NASA. Por ser o primeiro satélite de observação canadense e o primeiro sensor orbital de radar orientado operacionalmente, esse sistema tem proporcionado informações valiosas para exploração e monitoramento dos recursos naturais.

O sistema RADARSAT adquire dados na banda C (5,6 cm de comprimento de onda) do espectro de microondas, com polarização HH (http://www.space.gc.ca/csa_sectors/earth_environment/radarsat/). As vantagens da utilização das imagens RADARSAT em relação àquelas obtidas por sensores que operam no espectro refletido são (Paradella, 1997): (i) obtenção de imagens em condições atmosféricas adversas, como fumaças, nuvens e chuvas; (ii) grande sensibilidade a variações da morfologia (macrotopografia) da superfície terrestre (vantagem principalmente no Equador, onde a elevação solar não permite grandes sombreamentos com dados óticos); (iii) sensibilidade a variações de rugosidade do terreno (microtopografia); (iv) razoável penetração na superfície (metros); (v) geometria de aquisição controlada, independente de iluminação solar e possibilidade de imageamento noturno (maior

'resolução temporal' e facilidade extra para a obtenção do dado); (vi) possibilidade de estereoscopia.

A geometria de visada lateral do RADARSAT realça os acidentes topográficos, que auxiliam na interpretação de lineamentos. O modo de varredura fina, com ângulos altos, acima de 40°, enfatiza as estruturas geológicas mais sutis, dado que as sombras são minimizadas, porém ocorre um aumento do "layover" (inversão do relevo). As variações de tom são igualmente distribuídas por toda cena e os lineamentos são claramente identificados, sendo portanto o mais adequado para o mapeamento de estruturas geológicas.

As imagens da região de Serra Leste foram adquiridas pela RADARSAT, no modo *Fine Resolution Path Image* (varredura fina), com visada descendente e ângulo de incidência F3 (41° a 44°), cobrindo uma área de aproximadamente 50 X 50 km, com resolução aproximada de 8 metros. A aquisição da imagem foi feita no dia 17 de maio de 2000, às 8:52 horas.

A interpretação correta das imagens de radar demanda uma compreensão básica dos efeitos relacionados à posição e inclinação das encostas em relação à plataforma ("layover", "foreshortening" e sombreamento); sobre a geometria da imagem e seus valores radiométricos.

4.3 – Processamento Digital dos Dados de Sensoriamento Remoto

4.3.1. Dados do Landsat-7/Enhanced Thematic Mapper Plus

O processamento das imagens de sensores óticos passivos como o ETM+ envolve uma série de procedimentos, os quais podem ser executados de três diferentes maneiras (Sabine, 1999). Uma é o método de tentativa e erro, onde combinações e permutações de bandas, operações aritméticas entre bandas e análises por principais componentes são experimentadas indefinidamente, na expectativa de que algo interessante apareça no monitor. Outra maneira é o método do 'oráculo', no qual os dados são tratados dentro da mais avançada tecnologia computacional e um resultado é apresentado ao usuário, com um mínimo de interferência humana. Nesses procedimentos, geralmente os produtos não atendem às necessidades do geólogo. A melhor

maneira é produzir imagens que ressaltem atributos específicos da paisagem em um formato intuitivamente interpretável pelo geólogo, gerando uma ou mais imagens que ilustrem aspectos geológicos específicos da cena, como litotipos, estruturas e/ou alteração hidrotermal.

Diversas técnicas de processamento de dados de sensoriamento remoto estão disponíveis, na maioria dos casos, altamente especializadas e raramente aplicadas. O conjunto de técnicas disponíveis para o processamento de imagens aplicado à exploração mineral é muito pequeno. Isso inclui imagens de composições coloridas, usualmente com algum tipo de contraste, razões entre bandas, análise por principais componentes e transformações IHS (intensity-hue-saturation).

Para o processamento das duas cenas ETM+ utilizadas neste estudo, foram utilizados os programas Xspace, GCPWorks, ImageWorks e Geoanalyst do software da PCI Geomatics™.

4.3.1.1 - Pré-processamento

As imagens ETM+ foram georreferenciadas ao sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), zona 22 Sul, utilizando o elipsóide SAD Brazil 1969. As imagens foram corrigidas geometricamente por registro imagem-a-imagem, usando como referência imagens previamente registradas, do Landsat5-TM, disponíveis no acervo de dados. O registro foi feito com o software GCPWorks, onde foram obtidos pontos de controle com erro médio quadrático de 1.29 em X e 1.24 em Y, para a cena 223-64 e de 0.58 em X e 0.75 em Y, para a cena 224-64. Para o registro das imagens foi utilizado um polinômio de 1º grau e um interpolador cúbico.

O passo seguinte, ainda no GCPWorks, foi a elaboração de um mosaico de imagens contendo as duas cenas, de onde foi recortada a imagem da área em estudo.

A radiação obtida pelo sensor inclui contribuições do espectro da irradiação solar, absorção e espalhamento atmosféricos, efeitos da geometria de visada, além da reflectância dos alvos na superfície. As cenas utilizadas para a cobertura da área desse trabalho foram fornecidas com elevado nível de correção radiométrica. As diferenças radiométricas entre as imagens foram equalizadas na geração do mosaico, ajustando-se a estrutura dos histogramas das duas cenas, através de ferramentas do GCPWorks (PCI).

4.3.1.2 - Processamento

Composições Coloridas

Uma composição colorida é uma imagem onde diferentes bandas espectrais são mostradas nos canais vermelho, verde e azul do sistema RGB (red-green-blue).

A Figura 4.1a apresenta uma imagem usando as bandas espectrais 4, 5 e 3 do ETM+ em RGB, para qual foi aplicado um realce que utiliza uma função quadrática e uma suave redução da saturação, feita interativamente. Essa imagem mostra as áreas com vegetação em castanho claro, as áreas com vegetação rasteira em azul claro, os corpos de água em azul escuro (lago do garimpo de Serra Pelada) e as formações ferríferas e carapaças lateríticas em azul esverdeado (e.g., depósito de ferro Serra Leste). Crósta & Moore (1989) mostram que a combinação das bandas 4, 3 e 1 em R, G e B, respectivamente, funcionaram bem para o mapeamento de solos ricos em óxido de ferro em regiões com cobertura vegetal e manto de intemperismo espesso. Na imagem da área de Serra Leste, a composição 4-3-1, realçada com uma função quadrática, mostra a vegetação em vermelho, as áreas sem vegetação em azul claro e as formações ferríferas e carapaças lateríticas em azul esverdeado (Figura 4.1b), realçando as mesmas feições observadas na composição 4-5-3, exceto pelo lineamento da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (ZCTC), que aparece em cores mais saturadas. Crippen (1989) sugere a composição entre as bandas 1, 4 e 7 em RGB, para o mapeamento de feições litológicas em regiões onde dominam argilo-minerais, em diversas condições climáticas. A composição 1-4-7 da área em estudo apresenta a vegetação em verde, as formações ferríferas e carapaças lateríticas em magenta e as áreas sem vegetação em lilás (Figura 4.1c). Nas áreas sem vegetação, no lineamento da ZCTC e nos *splays* deste lineamento, as cores aparecem mais saturadas na imagem, possivelmente

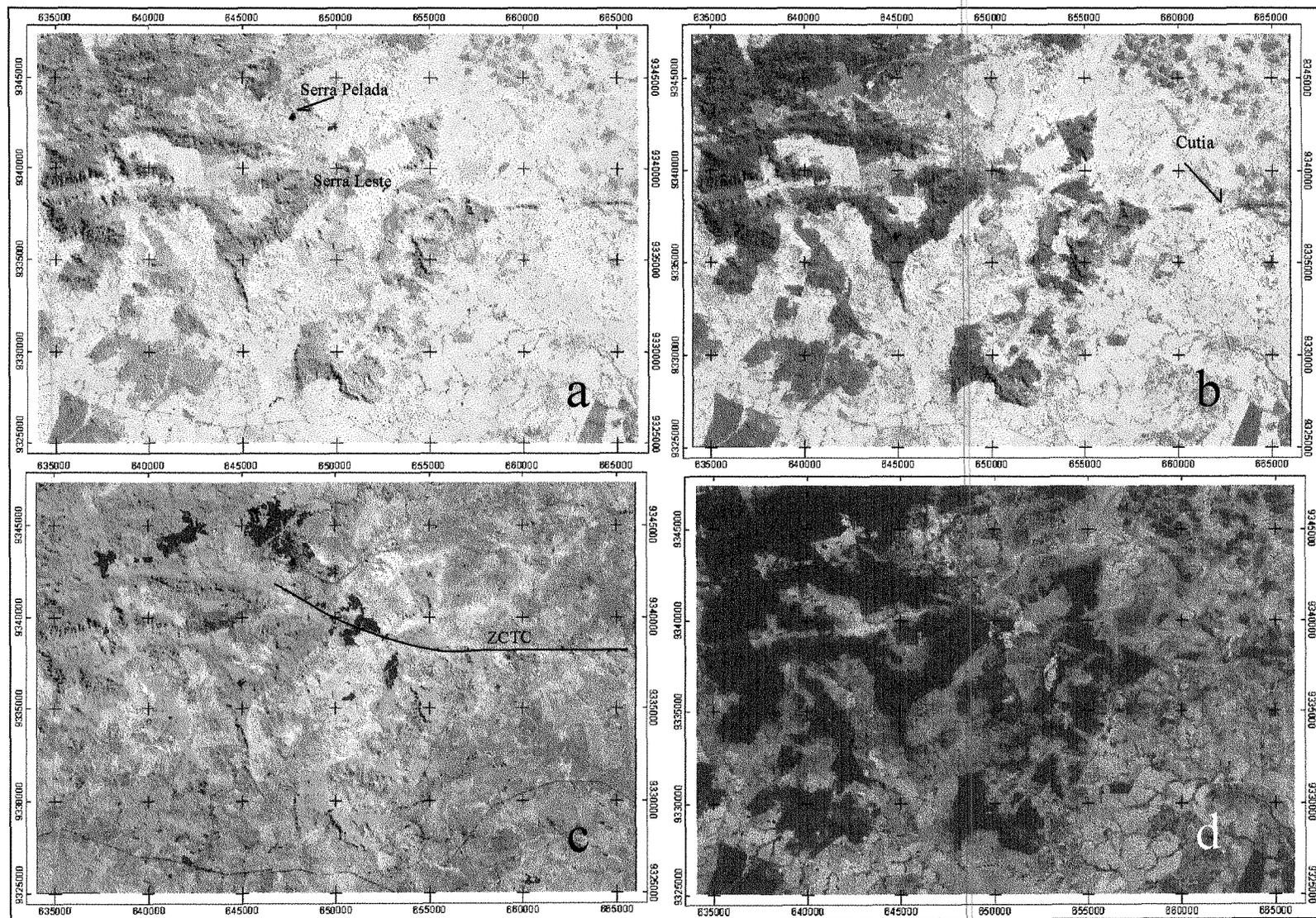


Figura 4.1 - Prancha de imagens, mostrando os produtos dos realces aplicados à imagem do ETM+ (a = composição colorida 453, b = composição colorida 431, c = composição colorida 147 e d = razão 5/4), realçando as áreas com vegetação, as formações ferríferas, carapaças lateríticas e zonas de alteração hidrotermal relacionadas às principais estruturas.

como reflexo da ocorrência de sílica e argilo-minerais associados - entretanto, as unidades litológicas não são realçadas nesta composição.

Dois aspectos se destacam nas propostas de composições coloridas anteriormente descritas e apresentadas na Figura 4.1: (i) a adição da banda ETM+_4 (infravermelho próximo) na composição, na qual a vegetação reflete fortemente; (ii) o uso da banda ETM+_1 (região do azul do espectro) que é a mais afetada por efeitos de espalhamento atmosférico, de difícil correção. Neste trabalho, a estratégia para geração de composições coloridas primeiramente levou em consideração esses aspectos. As composições coloridas utilizando bandas cobrindo o intervalo acima da região do verde foram favorecidas (menor atenuação atmosférica) e a banda ETM_4 foi excluída das composições, evitando a forte interferência da vegetação nos pixels das imagens. A banda 7 (2.09-2.35 μ m) foi

preferencialmente utilizada devido às respostas espectrais diagnósticas de minerais formadores das rochas máficas e ultramáficas (Drury, 2001), principais metalotectos das mineralizações de EGP na área de estudo. Entre esses minerais, destacam-se (Figura 4.2 e 4.3):

⇒ **talco e serpentina**: minerais formadores de rochas ultramáficas, presentes em superfícies relativamente frescas. Apresentam assinaturas espectrais dominadas por feições de absorção entre 2.3-2.4 μ m, relacionadas à ligação Mg-OH.

⇒ **saponita**: mineral do grupo da esmectita comumente presente como produto de alteração intempérica de rochas ultramáficas, também com feições de absorção entre 2.3-2.4 μ m.

⇒ **tremolita/actinolita e hornblenda**: minerais comuns em rochas máficas frescas. Apresentam assinaturas espectrais dominadas por feições de absorção entre 2.3-2.4 μ m, relacionadas à ligação Mg-OH e efeitos da presença de Fe²⁺.

⇒ **nontronita**: mineral do grupo da esmectita comumente presente como produto de alteração intempérica de rochas máficas, também com feições de absorção entre 2.3-2.4 μ m.

As bandas 2 e 3, relativamente menos afetadas por fenômenos atmosféricos, foram consideradas nas composições em função da sua clássica resposta para superfícies ricas em óxidos e hidróxidos de ferro (e.g., goetita, hematita, jarosita) (Sabine, 1999).

Além das bandas do espectro refletido, a banda termal (ETM+_6), com resolução espacial de 60m re-amostrada para 30m, também foi testada para realce de áreas ricas em minerais ~~associados a rochas ultramáficas com respostas importantes nesse intervalo do espectro (Figuras 4.6 e 4.7).~~

Dois produtos apresentaram resultados satisfatórios dentro desta estratégia de combinação de bandas: 357 (RGB) e 356 (RGB) (Figuras 4.6. e 4.7). Na Figura 4.6 é possível notar que os tons avermelhados na imagem estão predominantemente inscritos nos polígonos das rochas máficas e ultramáficas. Este comportamento é devido à reflexão de radiação por essas rochas na região do vermelho do espectro, fenômeno detectado pela banda ETM+_3. A banda 7 contribui na assinatura espectral das formações ferríferas e das coberturas lateríticas (tons azul-arroxeados na porção centro-noroeste da imagem).

Principais Componentes

A Análise por Principais Componentes (APC) é uma técnica estatística multivariada que seleciona combinações lineares de variáveis não correlacionadas, de modo que cada combinação linear extraída sucessivamente, ou principal componente, tenha uma variância menor (Drury, 2001). A variância estatística em imagens multiespectrais relaciona-se à resposta espectral de vários materiais superficiais, assim como à dimensionalidade estatística dos dados da imagem. A grande vantagem de métodos que se utilizam de cálculos de principais componentes é a possibilidade de

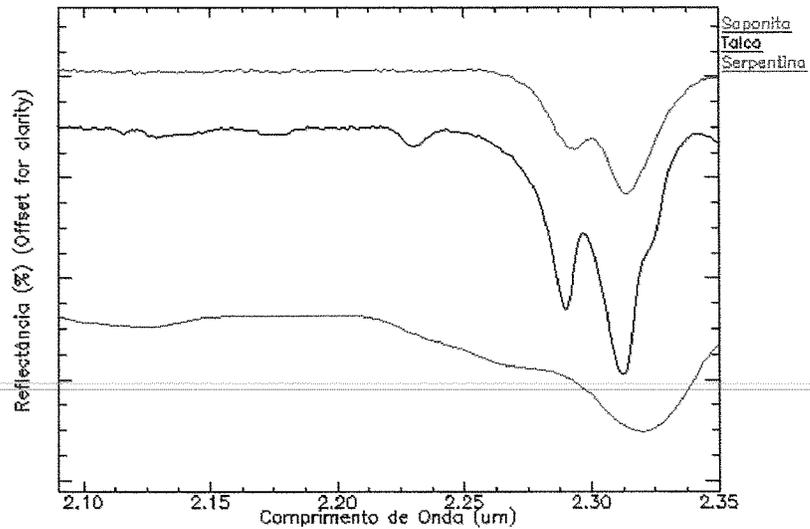


Figura 4.2. Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas ultramáficas na região do espectro coberta pela banda ETM+_7 (2.09-2.35μm). Dados espectrais extraídos da biblioteca do USGS.

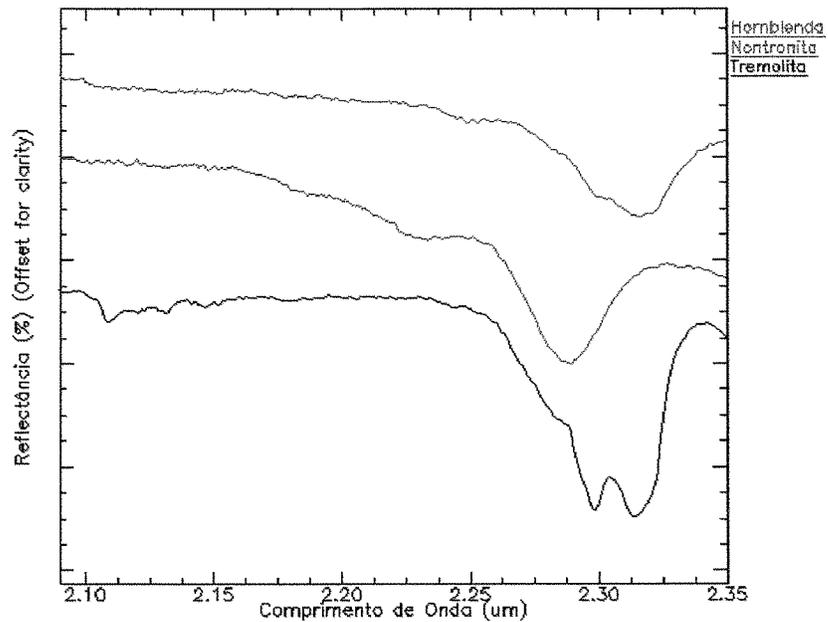


Figura 4.3. Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas máficas na região do espectro coberta pela banda ETM+_7 (2.09-2.35μm). Dados espectrais extraídos da biblioteca do USGS.

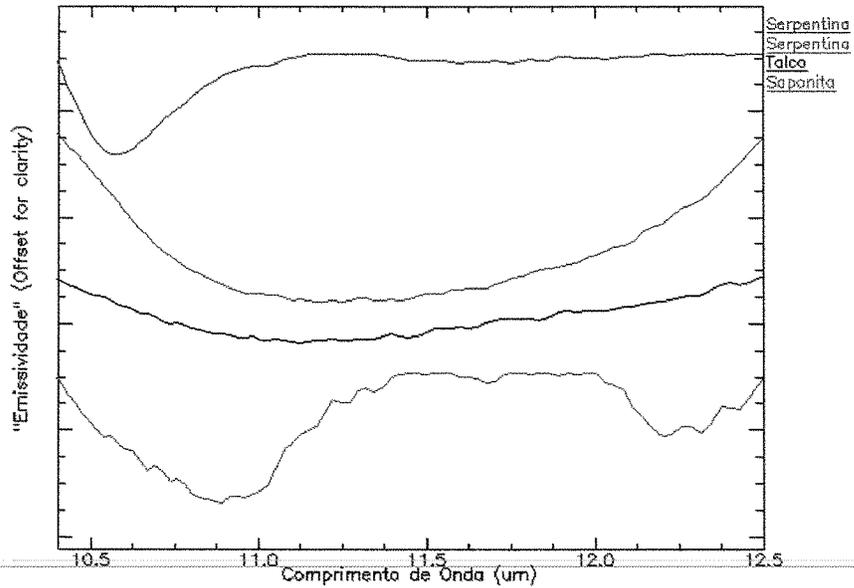


Figura 4.4. Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas ultramáficas na região do espectro coberta pela banda ETM+₆ (10.40 - 12.50 μ m). Dados espectrais extraídos da biblioteca da Johns Hopkins University – as medidas foram realizadas com um espectrofotômetro Nicolet FTIR (cf. <http://asterweb.jpl.nasa.gov>).

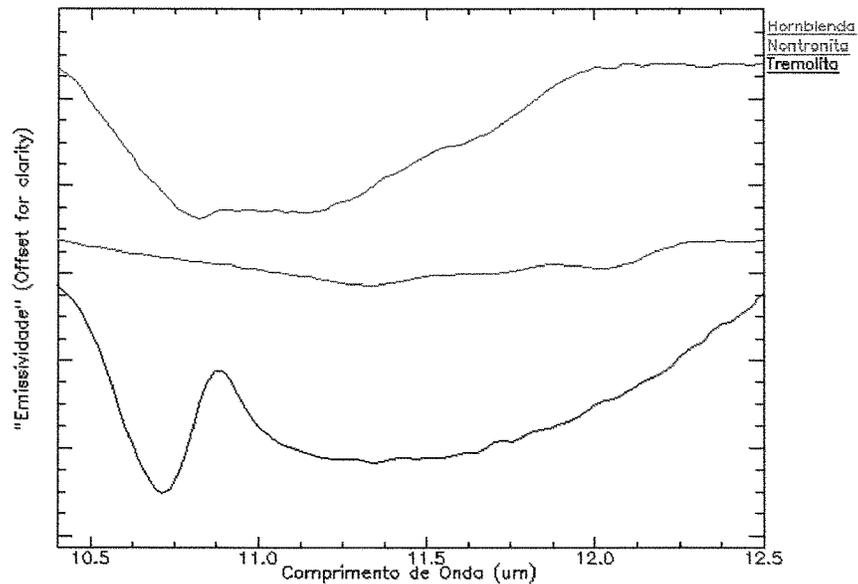


Figura 4.5. Assinatura espectral de minerais comumente associados a rochas máficas na região do espectro coberta pela banda ETM+₆ (10.40 - 12.50 μ m). Dados espectrais extraídos da biblioteca da Johns Hopkins University – as medidas foram realizadas com um espectrofotômetro Nicolet FTIR (cf. <http://asterweb.jpl.nasa.gov>).

supressão dos efeitos da vegetação, já que sua participação na estatística da cena pode ser mapeada e individualizada. Das técnicas baseadas na análise por principais componentes aplicou-se a Técnica FPCS (*Feature Oriented Principal Component Selection* - Crósta & Moore, 1989). Esta técnica foi escolhida para mapeamento de minerais dos grupos das hidroxilas (e.g., saponita, nontronita, talco, serpentina, tremolita/actinolita) e óxidos/hidróxidos de ferro (e.g., goetita, hematita, jarosita), que podem marcar, independentemente ou simultaneamente, as assinaturas espectrais de rochas maficas-ultramáficas.

A técnica FPCS permite a discriminação entre os diversos tipos de coberturas através da análise de matrizes de autovetores utilizadas no cálculo das principais componentes. Desta forma, os valores dos autovetores são utilizados para prever qual imagem PC concentrará a informação diretamente relacionada às assinaturas espectrais teóricas do alvo. O ordenamento das PCs é influenciado tanto pela abundância espacial de pixels representantes dos vários alvos geológicos, quanto pelo desvio padrão (variância) de cada banda. Originalmente, este método utilizava um conjunto de seis bandas, onde as componentes principais contendo maior informação a respeito do grupo de minerais de interesse seriam selecionadas. Loughlin (1991) propôs uma adaptação desta técnica, onde ao invés de seis bandas, dois conjuntos de quatro bandas são submetidos a APC: 1457 e 1345. Estes conjuntos realçam, respectivamente, minerais do grupo das hidroxilas e dos óxidos/hidróxidos. Através da inspeção dos valores e sinais para os autovetores extraídos para o conjunto de bandas TM 1345, observa-se que, em geral, a PC3 ou a PC4 apresenta altos valores para as bandas 3 e 1, com sinais inversos. O mesmo ocorre para o conjunto de bandas 1457 – a PC3 ou a PC4 apresentam valores altos, mas de sinais opostos para as bandas TM5 e TM7. O procedimento final de análise consiste na composição de uma terceira imagem, que combine os componentes com conteúdo alto de hidroxila (Hy) e de óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) numa composição colorida RGB. Esta terceira imagem, denominada Hy+Fe, consiste do cálculo da soma ou PC1 das componentes Hy e Fe.. Uma vez produzidas as imagens Hy, Fe e Hy+Fe, a interpretação visual final baseia-se em cores, no espaço RGB.



Figura 4.6. Composição colorida falsa-cor: bandas 357 (RGB). Os polígonos em branco na imagem correspondem a áreas onde afloram rochas máficas e ultramáficas, principais metalotectos associados as mineralizações de EGP.



Figura 4.7. Composição colorida falsa-cor: bandas 356 (RGB). Da mesma forma que a banda ETM+_7, a banda ETM+_6 (termal) contribui na assinatura espectral das formações ferríferas e das coberturas lateríticas (tons roxos na porção centro-noroeste da imagem).

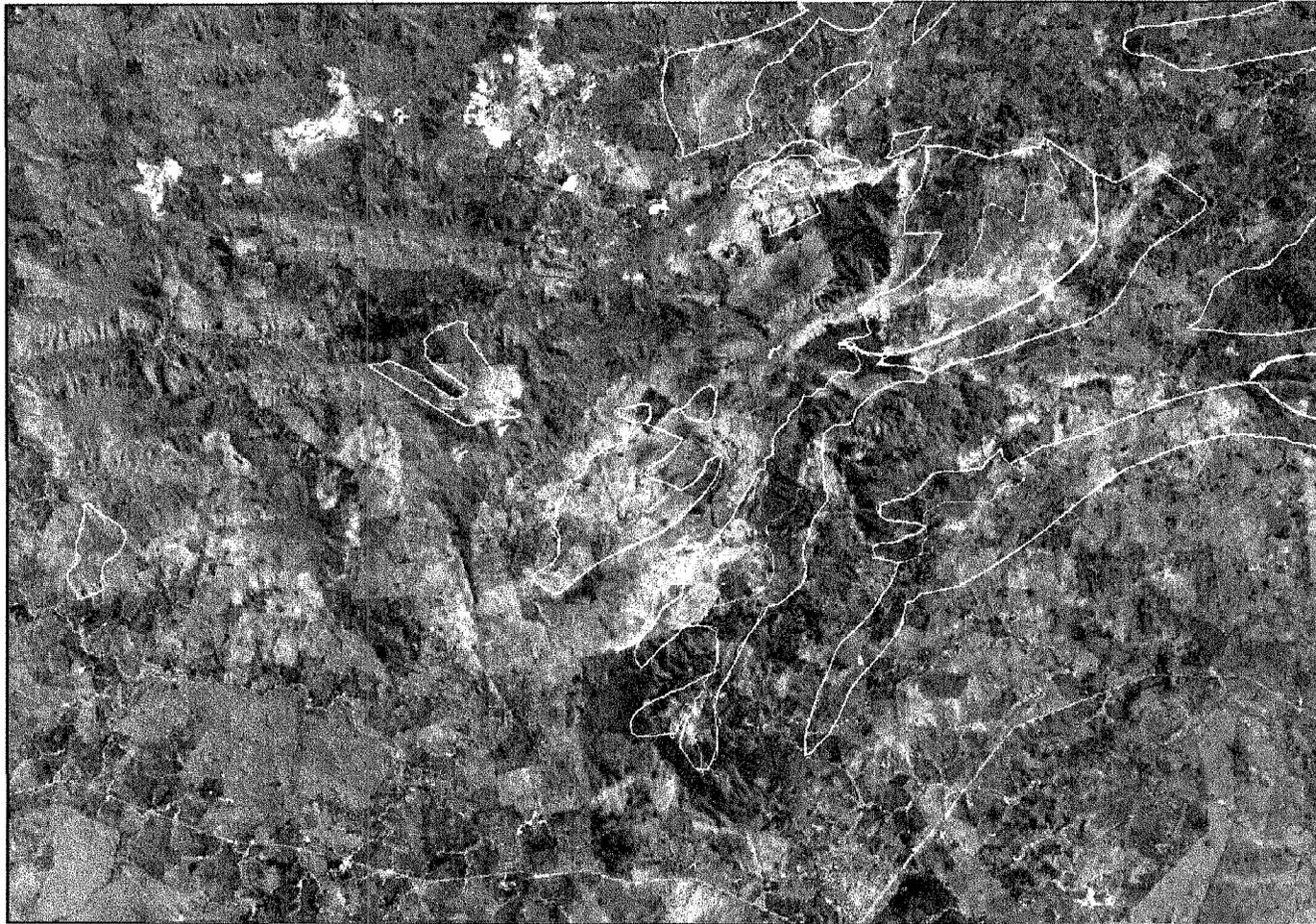
Neste trabalho, a técnica FPCS adaptada foi aplicada exatamente segundo os princípios descritos em Loughlin (1991). Os resultados são apresentados na Figura 4.8.

Transformação IHS

O espaço de cores conhecido como HSI (Hue-Saturation-Intensity) é uma forma de representação de cores em coordenadas polares, na qual as cores são definidas a partir dos atributos: intensidade (Intensity -I), matiz (Hue - H) e saturação (Saturation - S). Esse espaço de cores é alternativo ao espaço RGB, que é dado pela soma das cores primárias. Nesse sistema, a intensidade é relacionada ao brilho da imagem, a matiz representa o comprimento de onda dominante ('cor da imagem') e a saturação diz respeito à pureza das cores. No sistema HSI, os atributos da imagem podem ser manipulados individualmente, ao contrário do sistema RGB, onde estão interligados. Crósta (1992) descreve detalhadamente os passos dessa transformação.

A transformação do sistema RGB para o sistema IHS, nos sistemas modernos de processamento digital, é uma operação simples e tem duas utilidades principais no sensoriamento remoto aplicado à geologia: o realce por decorrelação e a integração de dados. Sabine (1999) descreve uma série de aplicações dessa transformação objetivando a integração de imagens de sensores remotos com diferentes resoluções espaciais, bem como, com imagens produzidas por levantamentos aerogeofísicos.

Uma das vantagens na utilização das imagens do ETM+ é a possibilidade da integração das bandas espectrais com resolução espacial de ~30 metros e a banda pancromática, com resolução espacial de ~15 metros, melhorando consideravelmente a resolução espacial das imagens produzidas. Essa transformação é feita através da integração da imagem de melhor resolução



Figuras 4.8. Composição colorida derivada da técnica FPCS adaptada, com contornos das rochas máficas e ultramáficas superpostos. As áreas em tons esbranquiçados indicam superfícies ricas, simultaneamente, em minerais de hidroxila e óxidos/hidróxidos de ferro. Note que uma porcentagem significativa dos corpos máficos e ultramáficos conhecidos foram detectados, enquanto outras áreas necessitam de verificação de campo. Observe ainda que as coberturas lateríticas e as formações ferríferas aparecem diferenciadas neste produto – as lateritas são ricas em argilas + ferro (branco), enquanto as formações ferríferas são predominantemente ricas em ferro (castanho).

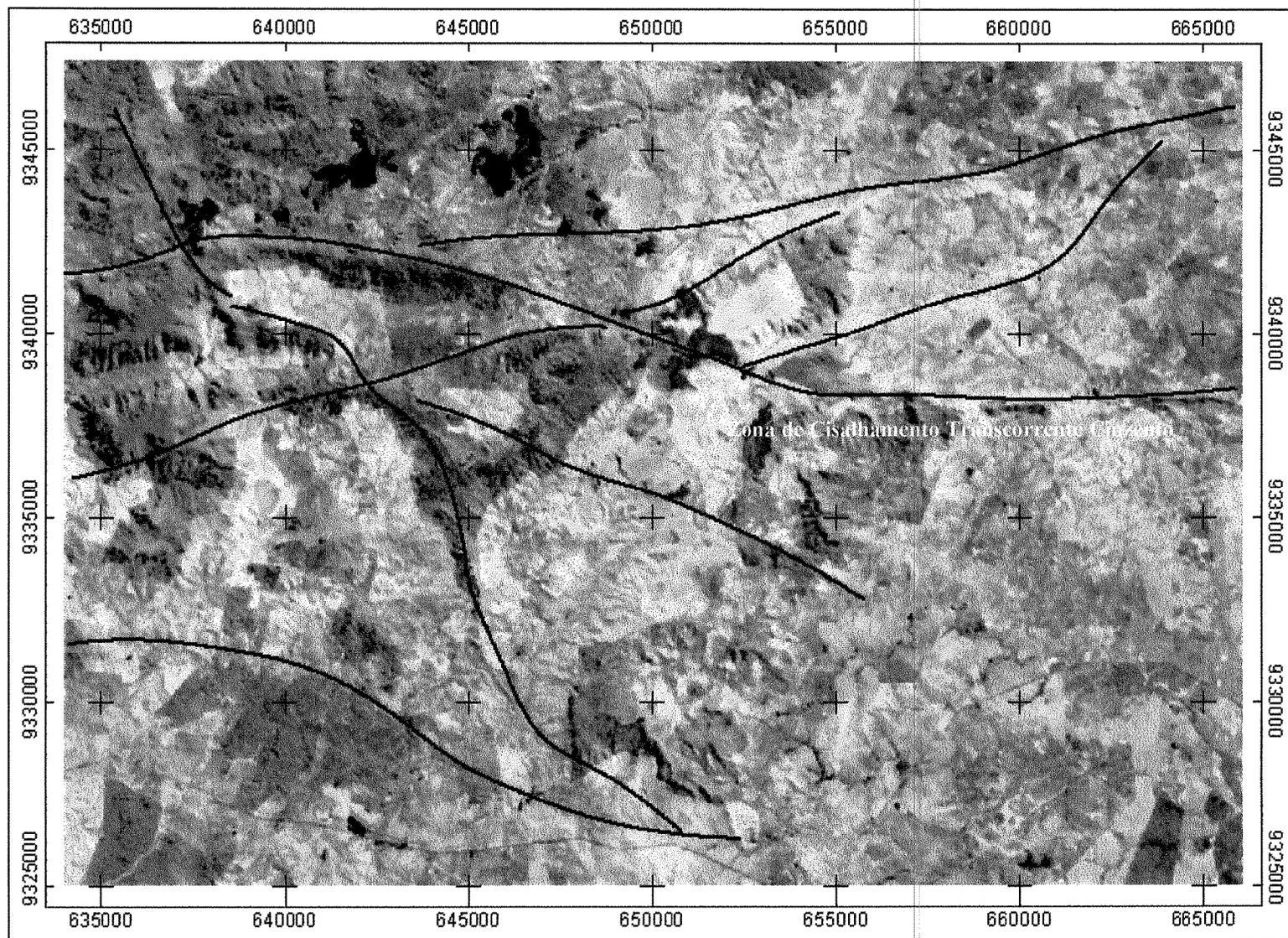


Figura 4.9 - Fusão da composição colorida entre as bandas 4, 5 e 3 (RGB), com a banda pancromática do ETM+, que permitiu identificar feições do relevo relacionadas ao *Splay* Divergente de Serra Pelada, a terminação Leste da Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento e os lineamentos interpretados a partir do produto integrado.

espacial (pancromática) no canal da intensidade. A integração da composição colorida das bandas 4, 5 e 3 (RGB) do ETM+, com a banda pancromática introduzida na intensidade do sistema IHS, apresenta uma considerável melhora na resolução espacial da imagem resultante. Isso permitiu a identificação de feições de relevo imperceptíveis na composição colorida 4-5-3 com resolução original de 30 metros (Figura 4.9). Para essa transformação RGB>IHS>RGB, foi utilizado o modelo cilíndrico para o espaço IHS.

4.3.2. Dados do RADARSAT

Há três etapas básicas de processamento das imagens de radar (Toutin & Gray, 1999): correção geométrica, correção radiométrica, realces e classificação. O quadro da Figura 4.10 sumariza as etapas seguidas nesse trabalho.

A correção geométrica é utilizada para referenciar a imagem utilizando pontos de controle no terreno (“ground control points” = GCPs), remover distorções topográficas e/ou registrar imagens com um modelo digital de elevação já existente. Correção radiométrica e realces lidam com a manipulação e aumento de contraste dos níveis de cinza da imagem. No caso de sensores que produzem somente um canal de imagem é possível realizar classificações baseadas em níveis de cinza, mas os resultados não são comparáveis àqueles obtidos com métodos de classificação multi-canais.

O processamento das imagens do radar orbital canadense RADARSAT foi feito com a utilização dos softwares Xpace, GCPWorks, ImageWorks e Geoanalyst, do pacote PCI, da Geomatics.

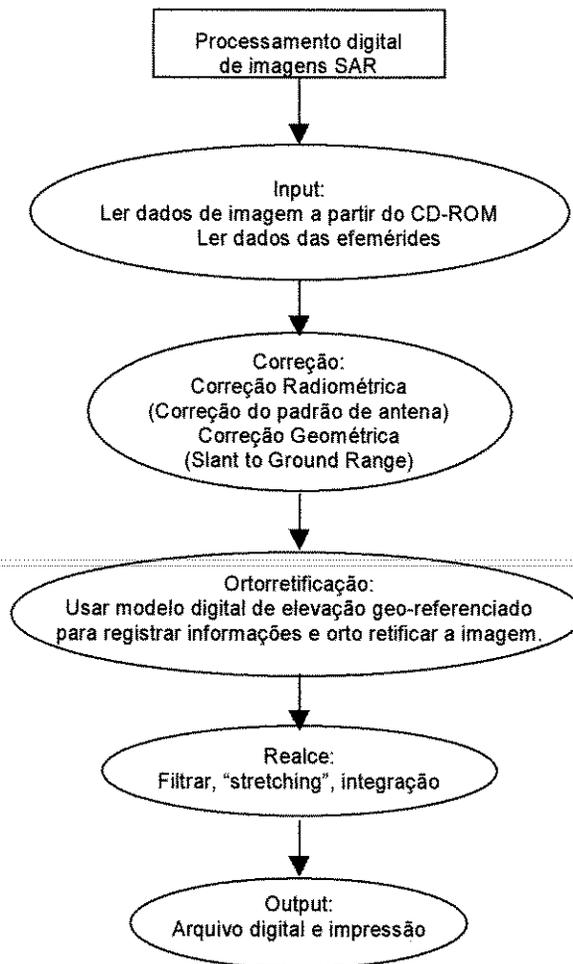


Figura 4.10: Etapas de processamento de imagens de radar.

4.3.2.1 - Correção Geométrica

A correção geométrica é um processo de transformação de imagens usado para remover distorções geométricas indesejáveis. Para isso é necessário coletar pontos de controle terrestres ou utilizar um modelo digital de elevação, para relacionar os dados não corrigidos aos dados geo-referenciados. As imagens foram referenciadas ao sistema UTM (Universe Transverse Mercator), zona 22 Sul, utilizando o elipsóide SAD Brasil 1969. A correção de alcance inclinado para alcance no terreno (*slant to ground range*) foi feita com

um modelo digital de elevação (DEM). Esse DEM foi elaborado a partir da digitalização de cartas topográficas na escala 1:100.000 e da coleta de pontos de controle no terreno.

4.3.2.2 - Filtragens e Realces

As imagens RADARSAT são caracterizadas pela presença de uma textura granulada, que gera um efeito “sal e pimenta” na imagem de radar. O sensor SAR transmite milhares de pulsos por uma dada área do terreno, definida como célula de resolução. Os pulsos são refletidos de muitos pontos de retrodispersão dentro da célula de resolução, porém o movimento do satélite faz com que cada pulso esteja posicionado em fase. Quando se somam vetorialmente os pulsos, as células de resolução, dentro de uma região de terreno homogêneo, tenderá a um valor de retrodispersão diferente. Uma área da superfície aparentemente homogênea tenderá a uma distribuição irregular de pixels claros e escuros, produzindo um efeito granular, denominado *speckle* (Henderson & Lewis, 1998). A Figura 4.11 ilustra a origem do *speckle*.

A remoção do *speckle*, através de filtros no domínio espacial ou no domínio das frequências, resultará em perda de informação potencialmente importante. Portanto, deve-se analisar cuidadosamente a metodologia utilizada, de forma que a perda de informação seja mínima e que o efeito suavizador total facilite a interpretação da imagem.

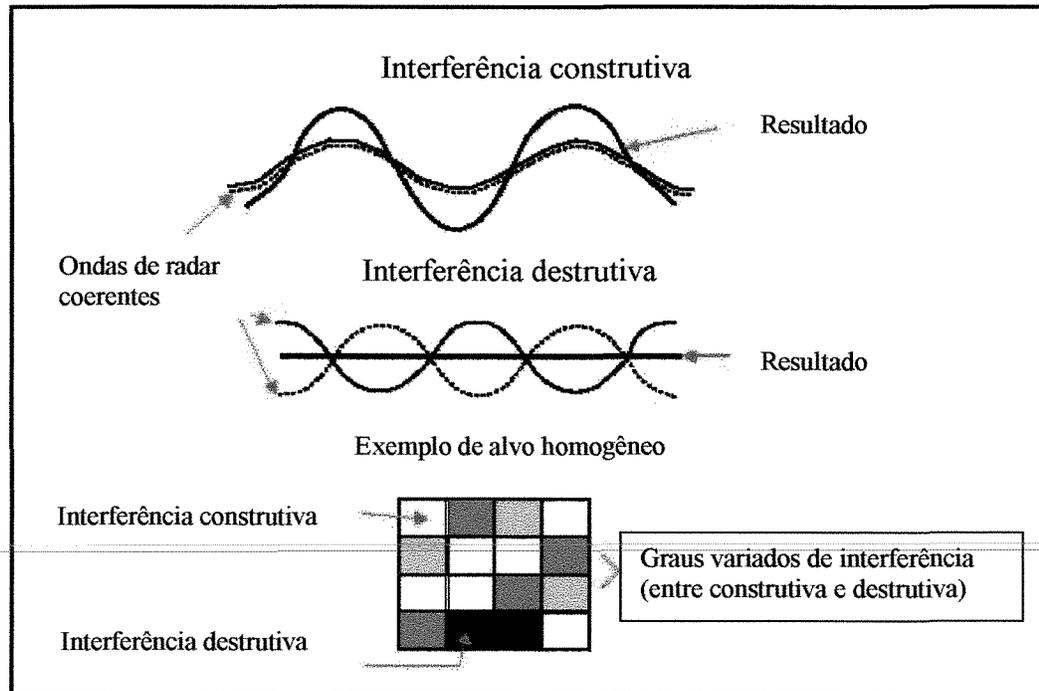


Figura 4.11. O fenômeno do "speckle".

A filtragem é um realce que altera os valores dos pixels com base nos valores de nível de cinza dos pixels adjacentes (Figura 4.12). Uma imagem pode conter tanto informações de alta como de baixa freqüência. A soma de ambas constitui a imagem original. Altas freqüências descrevem rápidas mudanças de um pixel para o outro, como, por exemplo, redes de drenagem, estradas e contatos geológicos. Já baixas freqüências descrevem mudanças graduais sobre um grande número de pixel, como corpos d'água e cobertura vegetal.

Os filtros passa baixa eliminam as feições de alta freqüência da imagem. Os filtros de passa alta dão ênfase a mudanças bruscas nos valores de níveis de cinza entre os pixels. Estas mudanças rápidas representam mudanças espaciais altas, também, chamadas de bordas. Tais bordas em uma imagem correspondem a feições lineares e a limites entre

feições. As imagens produzidas após a aplicação destes filtros são usadas como arquivos de entrada para melhorar o desempenho de algoritmos de classificação textural.

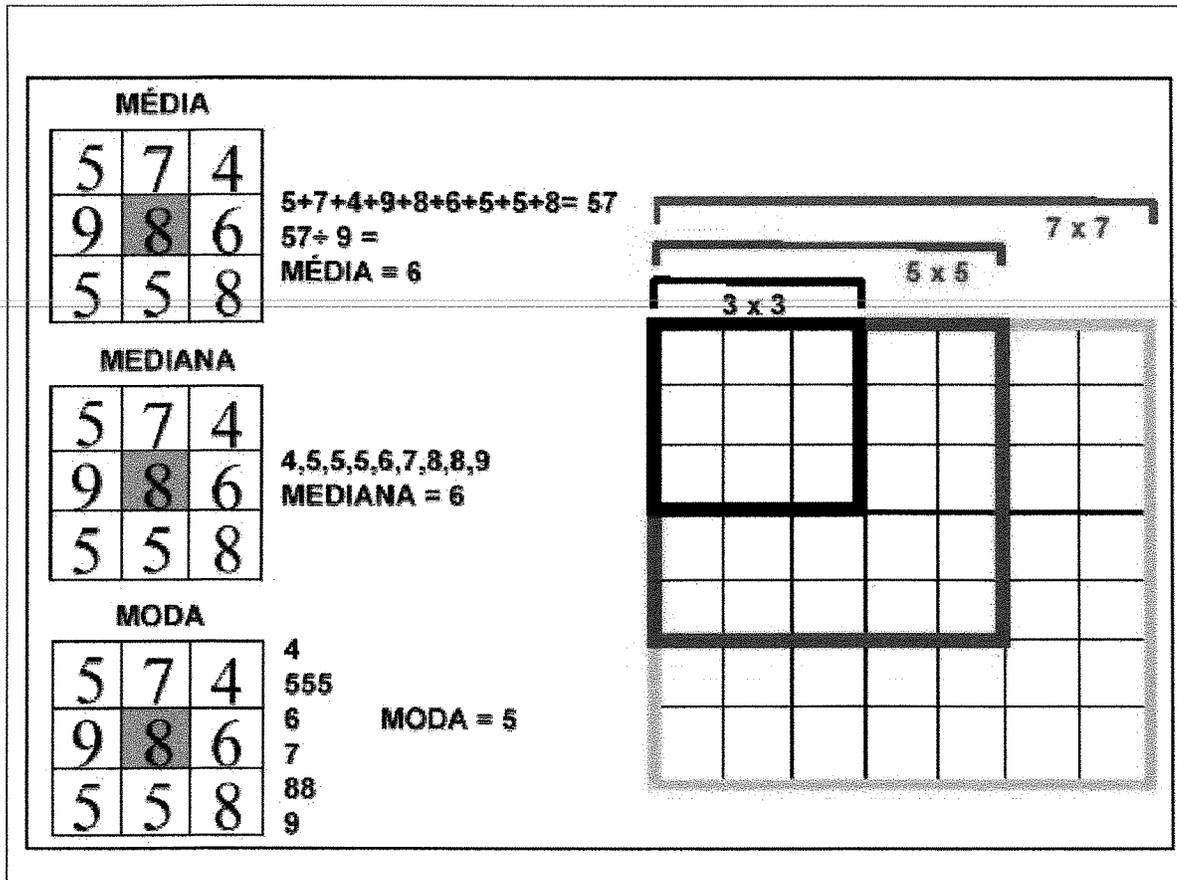


Figura 4.12. Filtragem por janela.

O pacote EASI/PACE manipula diversos algoritmos de filtragem projetados especificamente para dados SAR. O filtro de mediana calcula e atribui o valor da mediana de uma janela de filtro retangular ao pixel central. Este processo tende a suavizar a imagem e preservar as bordas. As dimensões da janela do filtro devem ser ímpares.

Os filtros adaptativos Kuan, Gamma, Lee e Frost, utilizam diferentes algoritmos, que suavizam as imagens sem remover bordas ou feições mais agudas da imagem.

O filtro Enhanced Lee divide a imagem em áreas de três classes. A primeira classe corresponde a áreas homogêneas nas quais o *speckle* pode ser eliminado pela aplicação de um filtro passa-baixa ou, equivalentemente, um processo *multi-look* proporcional. A segunda classe corresponde a áreas heterogêneas nas quais o *speckle* deve ser reduzido e a textura preservada. E a terceira classe é representada por áreas que contêm alvos isolados, cujos valores observados devem ser preservados pelo filtro.

No processamento das imagens da região de Serra Leste, vários tipos e tamanhos de filtros foram testados. Os melhores resultados foram obtidos com os filtros Lee e Enhanced Lee com a aplicação de uma janela 3 por 3, seguida por uma janela 7 por 7. A Figura 4.13 mostra a imagem da região de Serra Leste realçada por esses métodos e a interpretação dos vários sistemas de lineamentos detectáveis neste produto.

4.3.2.3 - Produtos Integrados

Este item tem como objetivo conceber alguns produtos integrados, utilizando os resultados obtidos a partir do processamento dos dados geofísicos e das imagens RADARSAT da área de Serra Leste.

Para a geração dos produtos integrados foi utilizada a técnica IHS (Rencz et al., 1994; Harris e Murray, 1989; Sabine, 1999; Schetselaar et al., 2000). O algoritmo de transformação IHS permite, ao se inserir três bandas de uma imagem nos canais R, G e B, determinar os parâmetros de intensidade, matiz e saturação da mesma e realizar diversas operações. Desta forma, foram manipuladas as imagens realçadas dos levantamentos de magnetometria e gamaespectrometria. A seguir foi feita a transformação inversa do espaço IHS para o espaço RGB, substituindo a intensidade (I) original pela imagem RADARSAT, com resolução espacial aproximada de 8 metros.

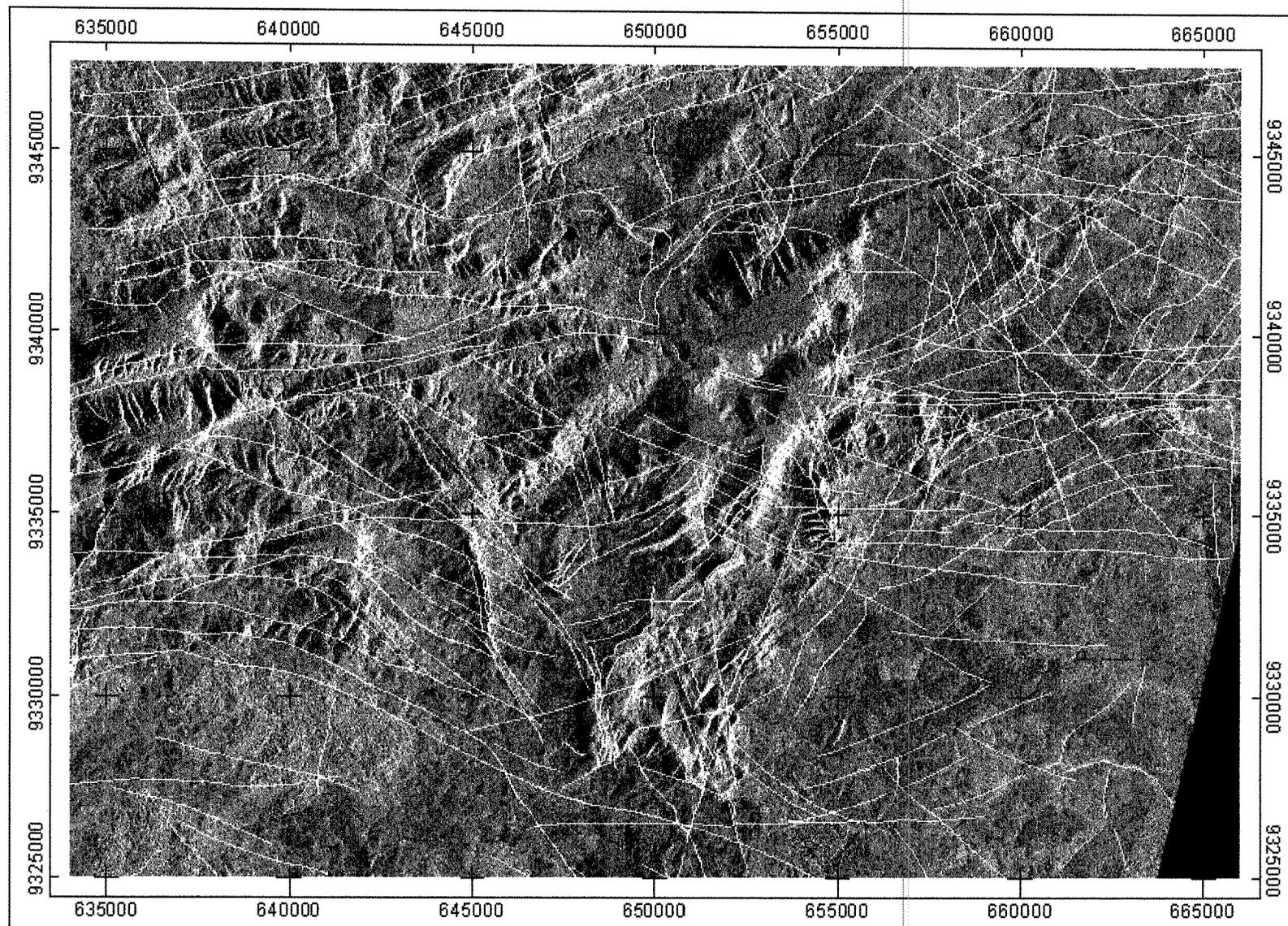


Figura 4.13—Imagem realçada RADARSAT, no modo Fine Resolution Path Image, com visada descendente, com ângulo de incidência F3 (41° a 44°), da região de Serra Leste e os Lineamentos interpretados da imagem RADARSAT.

Neste processo, a matiz das imagens realçadas da magnetometria e da gamaespectrometria foi preservada. Um nível de cinza constante (50) foi atribuído à saturação, com o intuito de realçar as cores, preservando as características texturais da cena. Posteriormente, foi aplicado um aumento linear de contraste às imagens produzidas, expandindo as informações originais do histograma da imagem para toda a escala de níveis de cinza disponíveis (0 – 255). Foram produzidas fusões da imagem RADARSAT com imagens: (i) do sinal analítico e da fase do sinal analítico do campo magnético anômalo; (ii) do canal do tório e, (iii) da imagem ternária dos canais K, Th e U (RGB) (Figura 4.14).

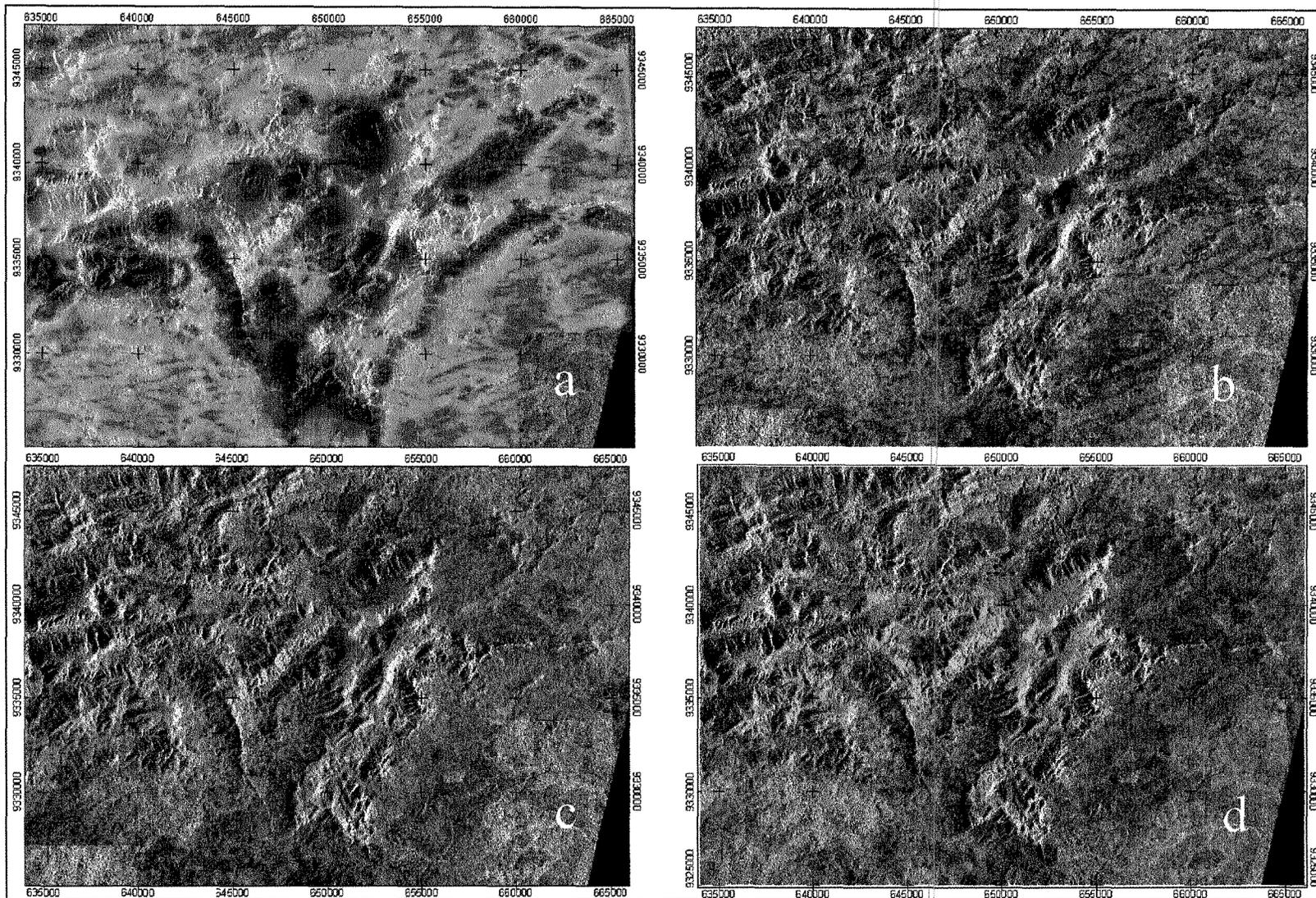


Figura 4.14 - Produtos integrados da imagem RADARSAT (Fine, descendente, F3) com imagens do levantamento geofísico aéreo de magnetometria e gamaespectrometria (a=sinal analítico, b=fase do sinal analítico, c=canal do tório e d=imagens ternária dos canais K, Th e U em R,G e B, respectivamente).

CAPÍTULO V

INTERPRETAÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO, PARA A GERAÇÃO DE MODELOS PROSPECTIVOS PARA EGP NA REGIÃO DE SERRA LESTE, CARAJÁS

5.1. Introdução

A interpretação e integração de dados multi-fontes tem sido amplamente utilizada para o mapeamento geológico e exploração mineral (Harris e Murray, 1989; Sabine, 1999). Neste sentido, excelentes resultados na região de Carajás foram obtidos por Paradella et al. (1997, 1998, 2000); Dias e Paradella, (1997), Veneziani e Okida (2001), entre outros. Neste capítulo é apresentada a interpretação dos dados geofísicos e de sensoriamento remoto da região de Serra Leste, bem como sua integração, visando a geração de um modelo prospectivo de EGP para essa região.

5.2 - Interpretação dos dados aerogeofísicos

5.2.1 - Magnetometria

A observação da imagem do campo magnético anômalo permite distinguir feições geológicas importantes, descritas no item 3.3.2.

Na imagem da derivada vertical de primeira ordem (Figura 3.9), observa-se uma série de alinhamentos de direção predominante NE, que correspondem às rochas máficas e ultramáficas orientadas segundo esta direção e mapeadas em trabalhos anteriores (Figura 2.3). Algumas anomalias que definem lineamentos de direção aproximada N-S são discretamente delineadas. Estes lineamentos estão relacionados aos diques gabróticos neoproterozóicos, que truncam a região de Carajás, os quais não são apresentados na Figura 2.3. Em geral, esses diques desenvolvem elevações ou depressões alinhadas no relevo, e afloram sob a forma de blocos arredondados

produzidos por esfoliação esferoidal, típica do intemperismo de rochas básicas, sendo facilmente mapeáveis no terreno.

Nas imagens das derivadas horizontais, as feições com orientação NE, representam os complexos máfico ultramáficos Luanga, Luanga Sul, Afrodite e Pegasus (Figura 3.10). As feições discretas com direção dominante NS ou NNW, representam a resposta dos diques de gabro magnético neoproterozóicos. Apesar de serem fortemente magnéticos e apresentarem espessuras de até 100 metros, a resposta magnética dos diques de gabro é representada por feições discretas neste produto, por estarem posicionados em direção próxima à das linhas de vôo. O lineamento da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (ZCTC) também pode ser claramente visualizado nesta imagem.

A imagem do gradiente horizontal (Figura 3.11) ilustra muito bem a compartimentação estrutural da área. Nesta imagem é possível observar o lineamento da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (ZCTC). Nesta imagem é possível observar o lineamento da ZCTC, cuja evolução compreendeu duas fases de deformação. A geometria das anomalias magnéticas geradas pelos complexos máfico ultramáficos Luanga e Luanga Sul permite reconstituir a cinemática dessas duas fases de cisalhamento transcorrente. Essa zona de cisalhamento compreende duas fases de deformação. A forma das anomalias, que representam as rochas ultramáficas ricas em magnetita dos complexos máfico ultramáficos, sugere um arrasto dextral na ZCTC, correlacionável à segunda fase de deformação de Veneziani & Okida (2001) e a quarta fase de deformação de Pinheiro e Holdsworth (1997) (Figura 2.5). Entretanto, o posicionamento atual dos complexos sugere um arrasto sinistral em uma fase posterior, indicando uma evolução progressiva, polifásica da deformação. O posicionamento atual dos complexos, também permite concluir que o deslocamento ao longo da ZCTC, na fase posterior, foi superior ao deslocamento ocorrido na fase anterior.

No complexo de Luanga ocorrem “*splays*” da ZCTC, posicionados subparalelos às camadas do complexo, muitas vezes enriquecidos em magnetita. Essa concentração de magnetita nos “*splays*” pode ser responsável por pelo menos parte das anomalias magnéticas que, na imagem do gradiente horizontal (Figura 3.11), aparecem orientadas segundo a direção NE, posicionadas sobre os complexos. Entretanto, é necessário cuidado na interpretação das anomalias do gradiente horizontal do campo anômalo sem redução ao polo, visto que estas não

estão posicionadas sobre suas respectivas fontes causadoras. As feições discretas orientadas segundo a direção N-S, são correlacionadas aos diques gabróicos neoproterozóicos (Figura 3.11).

Na imagem do sinal analítico, a região central da área mostra-se bastante perturbada magneticamente, com um relevo magnético variável, indicando corpos magnéticos com alta frequência e alta amplitude do sinal analítico. A análise da imagem da amplitude do sinal analítico permitiu a discriminação de várias unidades magnéticas. Nas áreas de afloramento dos complexos máfico ultramáficos (Luanga, Luanga Sul, Órion, Afrodite, Pégasus, Luanga Norte, Formiga e Centáuro), as altas amplitudes do sinal analítico estão relacionadas às rochas ultramáficas ricas em magnetita (dunitos, peridotitos, serpentinitos e talco-xistos) e a zonas de cisalhamento que truncaram esses complexos e remobilizaram magnetita das unidades ultramáficas. As anomalias positivas do sinal analítico na porção centro-norte da área ocorrem sobre as formações ferríferas dos depósitos de ferro Serra Leste. As discontinuidades nos padrões de anomalia, com feições de direção geral N-S ou NNW, com altos discretos da amplitude do sinal analítico, representam os diques de gabro Neoproterozóicos, com magnetita, que truncam o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas. Uma anomalia localizada na porção extremo NW da área, com alta amplitude do sinal analítico, compreende a resposta dos metassedimentos da Serra do Sereno, hospedeiros de mineralizações de manganês (Figura 3.13). O lineamento da zona de cisalhamento transcorrente do cinzento (ZCTC) e algumas das zonas de cisalhamento que compõem o “splay” divergente de Serra Pelada (Pinheiro e Holdsworth, 1997), podem ser observadas nesta imagem. O arrasto dúctil dextral, com reativação sinistral, ao longo da ZCTC, indicado pela geometria e pelo posicionamento dos complexos máfico ultramáficos Luanga e Luanga Sul, também pode ser observado nesta imagem.

A fase do sinal analítico, ressalta eixos de lineamentos que não são tão destacados na amplitude do sinal analítico, principalmente aqueles associados às estruturas de segunda ordem da ZCTC, conforme descrito por Siqueira (1996) e Pinheiro & Holdsworth (1997). Enquanto a amplitude do sinal analítico ressalta os diques gabróicos de direção predominante N-S (Figura 3.13), a fase do sinal destaca as estruturas predominantemente E-W, relacionadas com as zonas de cisalhamento transcorrente que compreendem o “splay” Divergente de Serra Pelada (Figura 3.14).

Nos complexos máfico-ultramáficos, os eixos das anomalias da fase do sinal analítico representam o acamamento ígneo das unidades ultramáficas, ricas em magnetita (dunitos, peridotitos, serpentinitos e talco xistos) e/ou zonas de cisalhamento com magnetita remobilizada das rochas ultramáficas durante a deformação (como ocorre no complexo Luanga).

O mapa de soluções de Euler com índice estrutural zero (Figura 3.15), mostra conjuntos de soluções alinhadas com direção E-NE, de caráter sigmoidal, com profundidades de 0 a 300 metros, podendo chegar até 400 metros em porções mais restritas das soluções. Essas representam o padrão geral do mapa e estão relacionadas à orientação geral dos complexos máfico-ultramáficos. Na área do depósito de ferro de Serra Leste ocorre uma anomalia de soluções de Euler com formato circular e profundidades de até 600 metros. O lineamento da ZCTC é delimitado por um conjunto discreto de soluções de Euler, com profundidades de até 400 metros, orientadas na direção NW, na porção central da área. Note que os diques de gabro, com orientação predominante N-S ou NNW, visíveis na Figura 3.14, não são representados pelas soluções de Euler.

Os mapas de soluções de Euler com índice estrutural 0.5 e 1 (Figuras 3.16 e 3.17), de modo geral, preservam as mesmas feições observadas no mapa de índice 0, com um forte alinhamento das soluções segundo a direção NE, representando a resposta das unidades ultramáficas. Esses mapas exibem uma variação horizontal para as fontes magnéticas, através de conjuntos de soluções mais espessos. Nos mapas de soluções com índice 2 e 3 (Figuras 3.18 e 3.19), que modelam fontes com formatos cilíndricos e esféricos, respectivamente, observa-se concentrações de anomalias profundas entre 600 e 900 metros. Os resultados sugerem geometrias e profundidades semelhantes as das fontes magnéticas localizadas no depósito de ferro Serra Leste, a sul do complexo máfico ultramáfico Formiga, onde ocorrem formações ferríferas ricas em magnetita. A NE do garimpo de Serra Pelada ocorre uma anomalia de soluções de Euler (índice 2) indicando a existência de uma fonte magnética com forma cilíndrica (“pipe”) com profundidade superior a 250 metros.

5.2.2 - Gamaespectrometria

A imagem da contagem total da radiação gama (Figura 3.22), mostra uma correspondência dos valores baixos da radiação gama com a área de afloramento dos complexos máficos ultramáficos mapeados: (a) Luanga,

(b) Luanga Sul, (c) Órion, (d) Afrodite, (e) Formiga, (f) Luanga Norte, (g) Pégassus e sugere a presença de um outro conjunto de corpos ultramáficos, na porção oeste da área, aqui denominado Centáuro (h). As áreas com valores altos estão relacionadas à resposta das rochas granitóides arqueanas da Suíte Estrela (AgrE), do Complexo Xingu (AgrGni e AgrGntton) e dos granitos Eoproterozóicos do tipo Cigano (EoPgrC). A unidade localizada na porção central da área, caracterizada como sericita-quartzitos e sericita-xistos do Grupo Rio Novo (ARNq), apresenta valores intermediários a altos da radiação gama. ZCTC, é representada pelo arrasto sinistral das unidades geológicas e gamaespectrométricas ocorrido na terceira fase de deformação regional de Veneziani & Okida (2001).

A imagem colorida do canal do potássio (Figura 3.23) mostra uma seqüência de camadas intercaladas de quartzitos (ARNq) e metapelitos do Grupo Rio Novo (ARNm), na porção extremo NW da área. Os valores altos do canal do potássio, localizados na porção NE da área, representam a resposta dos granitos da suite Estrela (AgrE). Os granitos e tonalitos arqueanos do Complexo Xingu, que ocorrem na porção extremo sudeste da área, também são representados por valores altos do canal do potássio.

Na imagem colorida do canal do Urânio (Figura 3.24), as rochas granitóides arqueanas da suite Estrela (AgrE) e do Complexo Xingu e os granitos Eoproterozóicos do tipo Cigano são representados pelos valores mais altos. Os valores intermediários representam a resposta dos quartzitos (ARNq) e metapelitos (ARNm) do Grupo Rio Novo, que ocorrem na porção Norte e noroeste da área e das coberturas lateríticas (TQDL), que ocorrem na área do depósito de ferro Serra Leste, na porção centro norte da área (Figura 2.3). A porção oriental da ZCTC também pode ser observada nesta imagem.

A imagem colorida do canal do tório (Figura 3.25) apresenta uma excelente correlação entre os valores baixos, representados pela cor azul, e as áreas de ocorrência das rochas máficas e ultramáficas dos complexos: (a) Luanga, (b) Luanga Sul, (c) Órion, (d) Afrodite, (e) Formiga, (f) Luanga Norte, (g) Pégasus e (h) Centáuro. Os valores altos compreendem a resposta das rochas arqueanas de natureza granítica do Complexo Xingu (AgrGni e AgrGntton), da suite Estrela e o do granito Cigano, dos metassedimentos do Grupo Rio Novo (ARNq e ARNm) e das coberturas lateríticas (TQDL). O arrasto sinistral ao longo da ZCTC é indicado pelo

posicionamento dos complexos máfico ultramáficos Luanga e Luanga Sul, destacados nesta imagem do canal do tório.

A composição ternária dos canais K, U e Th, pelo sistema de cores RGB (Figura 3.27), permitiu a identificação de feições não perceptíveis a partir da observação de cada canal separadamente. Esta imagem confirma a correlação dos domínios de baixo tório com as áreas de valores baixos da radiação gama - representadas nesta imagem por cores escuras - relacionadas à resposta dos complexos máfico ultramáficos (Figuras 2.3 e 3.27). A imagem possibilita ainda a discriminação de áreas com potássio predominante, representadas em tonalidades avermelhadas, indicando enriquecimento relativo nesse elemento. No complexo Luanga, as áreas representadas pelas tonalidades avermelhadas estão relacionadas às áreas de afloramento dos granitos da suite Estrela (AgrE) e de alterações hidrotermais associadas à intrusão desses granitos. Os granitos desta suite, que ocorrem na área do garimpo da Formiga, estão representadas por cores claras, tendendo para o amarelo e o azul. Da mesma forma, o granito Cigano (EoPgrC) aparece em tons claros, tendendo para o branco e o azul claro, o que indica um predomínio relativo do urânio, porém, com valores altos para os três canais.

As carapaças lateríticas e coberturas quaternárias (TQDL), enriquecidas em Th, são representadas em tonalidades esverdeadas na imagem ternária da gamaespectrometria (Figura 3.27). Na área do depósito de ferro Serra Leste, além das áreas em verde, que representam as carapaças lateríticas, ocorrem áreas representadas pela cor azul, exatamente onde a ZCTC trunca o platô onde afloram as formações ferríferas. Esse comportamento indica um predomínio do urânio sobre os demais elementos na área da ZCTC. Essa concentração de urânio nas imediações da ZCTC, pode indicar que uma mudança das condições químicas proporcionou o enriquecimento deste rádioelemento, também observado por Dickson & Scott (1997) no sudeste australiano. O enriquecimento neste rádioelemento pode ser interpretado como uma evidência de atividade hidrotermal.

Os quartzo-clorita-xistos (ARNx) da unidade metavulcânica do grupo Rio Novo ocorrem predominantemente na porção central da área, intercalados entre os complexos máfico ultramáficos. São representados pelo predomínio de tonalidades esverdeadas, indicando enriquecimento relativo em tório (Figura 3.27).

Em geral as imagens da gamaespectrometria indicam que os grandes domínios litológicos apresentam contatos bruscos que representam descontinuidades marcantes na resposta gamaespectrométrica, indicando uma compartimentação tectônica em blocos, condicionada por falhas e zonas de cisalhamento ao longo dos contatos.

5.2.3 - Eletromagnetometria no Domínio do Tempo

As principais zonas condutivas destacadas na imagem da condutância aparente (Figura 3.31) ocorrem: (a) na porção NW da área e representam as camadas de pelitos carbonosos e manganésíferos do Grupo Rio Novo, que formam cristas alinhadas segundo a direção NE (parte da Serra do Sereno); (b) nas proximidades do garimpo do Formiga, onde ocorre uma zona condutiva importante, cuja fonte pode ser atribuída a um conjunto de fatores, incluindo o manto de intemperismo espesso, a presença das rochas ultramáficas do complexo Formiga, além da presença de formações ferríferas bandadas ricas em magnetita; (c) no complexo máfico ultramáfico Luanga, representado por uma unidade ultramáfica composta por rochas ricas em magnetita (dunitos, peridotitos e serpentinitos), com cristais conectados por venulações e bandas de cisalhamento; (d) na área do garimpo de Serra Pelada, atribuída a presença de siltitos carbonosos do Grupo Rio Novo e ao espesso manto de intemperismo, gerado pela dissolução do carbonato dos arenitos carbonáticos do Grupo Rio Novo e o preenchimento dos interstícios por água.

5.3 - Interpretação dos Dados de Imageamento Passivo (Landsat-7/ETM+) e Ativo (RADARSAT)

As imagens realçadas do *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) da área de Serra Leste foram úteis para discriminação: (a) dos setores com vegetação nativa (ombrófila densa submontana e de terras baixas); (b) dos setores onde a vegetação nativa foi substituída por pastagens e/ou solos expostos; (c) das coberturas lateríticas e formações ferríferas; (d) de argilo-minerais associados às principais zonas de cisalhamento transcorrente do *Splay* Divergente de Serra Pelada – SDSP (Pinheiro & Holdsworth, 1997 e 2000), permitindo inclusive o mapeamento dessas estruturas; (e) de concentrações de óxidos/hidróxidos de ferro (e.g., goetita) e

minerais portadores do radical hidroxila (e.g., talco, serpentina, saponita e nontronita), comumente associados a rochas máficas e ultramáficas.

A fusão das bandas 4, 5 e 3, via transformação IHS, com a banda pancromática, com resolução espacial de 15 metros, permitiu associar várias áreas ricas em argilas e talco a zonas de cisalhamento do SDSP (Figura 4.9). A imagen obtida a partir de principais componentes, através da técnica FPCS adaptada (Figura 4.8), mostrou-se útil para o mapeamento de rochas máficas e ultramáficas, metalotectos diretamente relacionados as mineralizações de EGP de Serra Leste.

A análise pelas principais componentes revelou um resultado interessante apresentado na Figura 4.8 , onde observa-se que as áreas de afloramento das rochas máficas e ultramáficas são representadas em tons esbranquiçados, podendo ser utilizada para mapeamento dessas áreas. As áreas esbranquiçadas representam superfícies ricas simultaneamente em hidroxila e óxidos/hidróxidos de ferro. As novas informações sobre possíveis ocorrências de rochas máficas e ultramáficas, derivadas do processamento dos dados multiespectrais, carecem de verificação de campo detalhada e ainda não constam no novo mapa.

A análise monoscópica da imagem do RADARSAT (Figura 4.13), adquirida no modo *Fine Resolution Path Image Fine*, com visada descendente e ângulo de incidência F3 (41° a 44°), possibilitou o adensamento da informação estrutural na área de Serra Leste, complementando sobremaneira os dados derivados no campo e a partir da interpretação das imagens Landsat-7.

5.4 - Análise e Interpretação de Produtos Integrados: Dados RADARSAT, Aeromagnéticos e Aerogamaespectrométricos

A interpretação das imagens RADARSAT seguiu a metodologia proposta por Veneziani & Anjos (1982), adaptadas para os dados SAR por Paradella et al. (1997 e 1999) e Santos et al. (1997). A imagem RADARSAT, no modo *Fine Resolution*, com visada descendente e ângulo de incidência F3 (41° a 44°), da região de Serra Leste, mostrou grande utilidade na identificação das feições estruturais relacionadas ao *Splay*

Divergente de Serra Pelada (SDSP), devido ao realce na representação das feições de relevo proporcionado pela visada selecionada (Figura 4.13).

Os produtos da integração das imagens RADARSAT com as imagens geradas a partir dos dados do levantamento geofísico aéreo (magnetometria e gamaespectrometria), proporcionaram a superposição, em uma mesma imagem, das informações geofísicas com as feições do relevo. A base geológica utilizada para a interpretação foi aquela apresentada no mapa geológico da Figura 2.3. Os critérios estabelecidos para a correlação dos dados geofísicos aos elementos lito-estruturais de Serra Leste são listados a seguir:

* Gamaespectrometria: (i) os valores baixos dos canais do tório e da contagem total da radiação gama estão relacionados com áreas de afloramento das unidades máfico ultramáficas do Complexo Luanga e do Grupo Rio Novo (ACLum e ARNumi, respectivamente), tratadas neste trabalho como complexos máfico ultramáficos; (ii) valores altos do canal do potássio e da contagem total estão relacionados às rochas graníticas (EoPgrC e AGrE) e à alteração hidrotermal associada (potassificação); (iii) na imagem ternária (K, Th e U - RGB) as áreas representadas em preto equivalem às áreas de abrangência das rochas ultramáficas dos complexos máfico ultramáficos (ARNumi e ACLum); as áreas escuras, que tendem ao vermelho, representam as unidades máficas desses complexos (ARNvb e ACLal).

* Magnetometria: (i) os eixos das anomalias discretas da amplitude do sinal analítico, orientados segundo a direção NNW, representam os diques de gabro granofírico com magnetita, Neoproterozóicos, que truncam o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas; (ii) as anomalias mais expressivas da amplitude do sinal analítico, orientadas ENE-NE, na porção centro leste da área, representam as rochas ricas em magnetita das unidades ultramáficas dos complexos, (iii) os eixos das anomalias da fase do sinal analítico correspondem à zonas de cisalhamento.

Essa abordagem permitiu a visualização de importantes elementos litológicos e estruturais e sua inter-relação, tais como: arrastos dúcteis, rompimentos e deslocamentos das principais unidades litológicas. Também permitiu o balizamento da mineralização de elementos do grupo da platina (EGP), no complexo máfico ultramáfico Luanga, com as unidades litológicas e com elementos estruturais.

5.5 – Assinatura Geofísica e Espectral dos Metalotectos Associados aos Depósitos de EGP em Serra Leste

Os resultados obtidos neste trabalho, aliados a verificações de campo, permitiram aprimorar o mapa geológico da Figura 2.3, elaborado por Veneziani e Okida (2001), resultando no mapa da Figura 5.1. Neste novo mapa, além do adensamento da informação estrutural, foram acrescentadas: (i) as áreas de afloramentos das formações ferríferas, na porção centro-norte da área (depósito de ferro Serra Leste); (ii) as áreas de carapaças lateríticas, entre os sedimentos detríticos terciário-quaternários, nas porções norte e noroeste da área, que recobrem formações ferríferas pertencentes ao Grupo Rio Novo; (iii) os diques de gabro granofirico Neoproterozóicos, encaixados em um sistema de fraturas NNW, que truncam todas as unidades litoestratigráficas que compõem o Cinturão de Cisalhamento Itacaiunas.

A Tabela 5.1 resume as principais características dos depósitos minerais de Serra Leste. Uma abordagem integrada dos diferentes dados geológicos, aerogeofísicos e de sensoriamento remoto disponíveis (cf. Figura 2.3), permitiu a caracterização das assinaturas geofísicas e espectrais das principais mineralizações da área estudada.

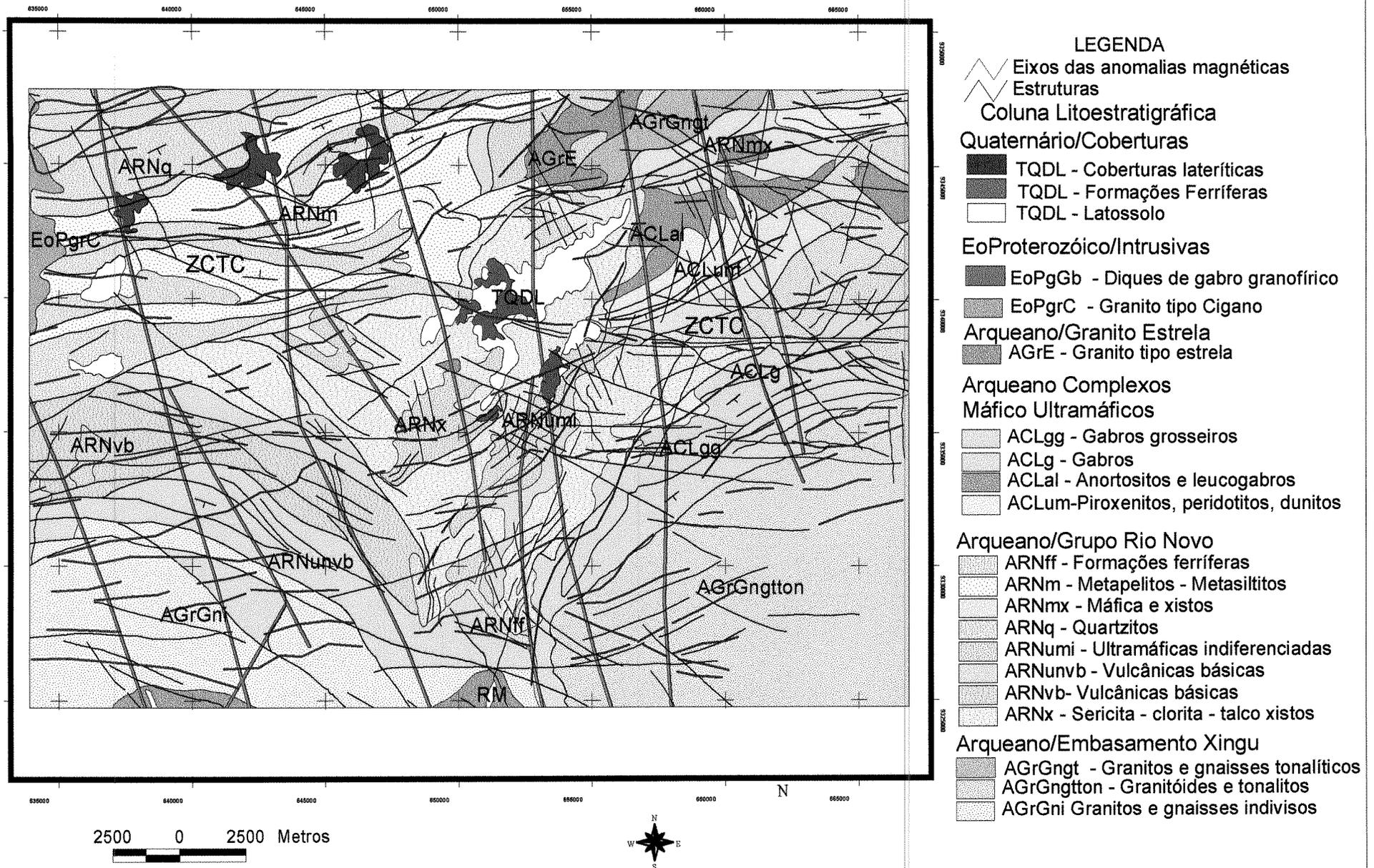
Depósitos	Tipo	Modelo Genético	Encaixante
Luanga/Central/Fênix	EGP	Singênético c/ remobilizações	Máficas e Ultramáficas
Serra Pelada	Au-Pd	Epigenético/Hidrotermal	Metasedimentos
Cutia	Au	Epigenético/Z. Cisalhamento	Milonitos/veios de quartzo
Formiga	Au	Epigenético/Z. Cisalhamento	Granito
Serra Verde	Cu-Au	Epigenético/Cu-Au-U-Ox.Fe	Granito/Gnaisses
Serra Leste	Fe	Epigenético/exogenético	Formações Ferríferas/Z.Cisalhamento

Tabela 5.1 – Características principais dos depósitos minerais de Serra Leste

Os depósitos de EGP estão restritos às áreas dos complexos máfico ultramáficos, mapeados como Complexo Luanga (ACL) e como unidade ultramáfica do Grupo Rio Novo (ARNumi) (Figura 2.3).

As rochas ultramáficas são representadas por altos valores na amplitude do sinal analítico, que caracterizam a soma das respostas magnéticas dos dunitos, metaperidotitos, serpentinitos, das zonas sulfetadas com pirrotita e das zonas de cisalhamento com magnetita. Nos metaperidotitos, a magnetita se forma junto com talco e serpentina, como produto da alteração das olivinas. Algumas porções dessa rocha contêm mais de 50% de

Figura 5.1- Mapa Geológico da Área Serra Leste, modificado de Veneziani e Okida (2001).



magnetita. Os serpentinitos são formados em zonas de cisalhamento que truncam os metaperidotitos, cujo produto de alteração é composto de serpentina e magnetita. Na imagem da fase do sinal analítico, os eixos das anomalias aparecem como feições anastomosadas, a exemplo de zonas de cisalhamento dúctil. Essas zonas de cisalhamento têm sido mapeadas nos complexos máfico-ultramáficos e nas demais unidades litoestratigráficas que compõem o splay divergente de Serra Pelada, definido por Pinheiro & Holdsworth (1997).

No complexo máfico ultramáfico acamadado Luanga, a mineralização de elementos do grupo da platina (EGP) está associada a um pacote de metapiroxenitos com textura cumulática, que contém pirrotita intercúmulus. A mineralização ocorre associada aos sulfetos (pirrotita e pentlandita), entre níveis de metaperidotitos e serpentinitos. A pirrotita associada a mineralização não mostra uma resposta característica, visto que é enfraquecida pela resposta das rochas ricas em magnetita (serpentinitos e peridotitos), que sobrepõem e superpõem o nível mineralizado. Entretanto, este nível ocorre paralelo ao eixo de uma anomalia da fase do sinal analítico, que representa a resposta de um pacote de serpentinitos deformados por uma zona de cisalhamento. Essa zona de cisalhamento se desenvolveu predominantemente ao longo de uma das camadas de metaperidotito, com zonas de alta deformação ao longo dos contatos e ou no centro da camada.

Os níveis mineralizados ocorrem sempre próximos ao contato entre os metapiroxenitos e os peridotitos/serpentinitos, o que faz com que os eixos das anomalias da fase do sinal analítico funcionem como guias para prospecção de EGP. Desta forma, os limites das anomalias destacadas na imagem da amplitude do sinal analítico são sítios potencialmente correlacionáveis à ocorrência de mineralizações de EGP.

Em geral, os depósitos da classe Cu-Au-U-ETR-Fe têm a magnetita como uma importante fase mineral dentro da paragênese hidrotermal, são relacionados à intrusões graníticas, o que torna todas as áreas circulares/elipsoidais onde existam anomalias da amplitude do sinal analítico, potenciais hospedeiras deste tipo de mineralização. Nesta classe de depósito, as rochas encaixantes são bastante variáveis; entretanto, a relação com intrusões graníticas é um indicador importante. Em muitos casos, as intrusões relacionadas ao processo hidrotermal, responsável pela mineralização, não são aflorantes. Os efeitos de enriquecimento das encaixantes em potássio e urânio podem ser indicadores de atividade hidrotermal relacionada à granitogênese. O depósito de Serra Verde, localizado na porção sudoeste da área (Figura 1.2), não apresenta magnetita associada à paragênese

da mineralização (calcopirita, pirita, pirrotita, pentlandita, cobaltita, apatita, quartzo e clorita). A ocorrência de pirrotita em pequenas quantidades (<1%) é responsável por uma discreta anomalia do sinal analítico (Figura 3.13).

Os complexos máfico-ultramáficos mostram baixos radiométricos nas imagens processadas (Figuras 3.22 e 3.25). Aparecem destacados sob cores escuras na composição ternária (Figura 3.27) e valores altos na razão U/Th (Figura 3.27). Na imagem do ETM plus a composição colorida derivada da técnica FPCS adaptada (Figura 4.8) as áreas em tons esbranquiçados que indicam superfícies simultaneamente ricas em minerais hidroxila e óxidos e hidróxidos de ferro, coincide com boa porção da área de afloramento das rochas máficas e ultramáficas.

É interessante observar que ao lado do garimpo de Serra Pelada existe uma pequena área representada por cores escuras, com valores baixos do canal do tório, compatível com a assinatura gamaespectrométrica das áreas de afloramento das rochas máficas e ultramáficas. Essa mesma área apresenta alta amplitude do sinal analítico e alta condutância aparente, também compatível com a assinatura desses litotipos. Nessas áreas, observam-se também porções com tonalidades avermelhadas que indicam um enriquecimento relativo em potássio. Essa resposta é associada à atividade hidrotermal relacionada à gênese da mineralização. A presença de rochas máficas e ultramáficas, próximo desta mineralização pode ser considerada evidência da fonte de Pt e Pd associados à mineralização de Au, Pt e Pd no garimpo de Serra Pelada.

Na imagem ternária do K, U e Th (RGB) (Figura 3.27), os polígonos em vermelho indicam áreas com enriquecimento em potássio. Essas áreas possivelmente são relacionadas a intrusões graníticas. Nessa mesma figura, setores destacados com contornos azuis, correspondem a áreas onde houve o enriquecimento relativo em urânio - um indicativo da presença de rochas alteradas hidrotermalmente. Estas evidências sugerem um excelente potencial para ocorrência de mineralizações do tipo Cu-Au-U-ETR-Fe neste setor.

Os poucos dados eletromagnéticos utilizados mostram uma excelente correlação com os complexos máficos ultramáficos acamadados. Estes podem ser caracterizados como domínios condutivos, representados por valores altos de condutividade aparente e valores intermediários de CTP. A boa resposta obtida com esses dados

permitiu a delimitação de domínios condutivos relacionados à ocorrência de rochas máficas e ultramáficas, bem como a delimitação de áreas favoráveis para EGP (Figuras 3.30, 3.31 e 3.33). O depósito Serra Verde, situado em uma zona condutiva, com soluções de CTP variando entre 11 e 30 miliSiemens, é associado a veios de sulfetos (calcopirita>>pirita>>pirrotita>pentlandita e cobaltita), quartzo e clorita, que ocorrem encaixados em rochas vulcânicas ácidas, com albita e biotita.

As assinaturas geofísicas e espectrais descritas acima para os metalotectos relacionados aos depósitos e mineralizações de EGP e Cu-Au-U-ETR-Fe, conhecidos na área de Serra Leste, são fornecidas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Sumário das assinaturas dos metalotectos associados aos depósitos e mineralizações (EGP e Cu-Au-U-ETR-Fe) da região de Serra Leste.

Depósito	Magnetometria	Gamaespectrometria	EMDT(GEOTEM)	ETM plus
Luanga (EGP)	Altos valores da amplitude do sinal analítico e da fase do sinal analítico (valor positivo)	Valores radiométricos baixos principalmente no canal do tório e na contagem total	Altos valores de condutividade e intermediários de CTP	Cores esbranquiçadas na imagem pela técnica FPCS adaptada
Serra Verde (Cu-Au)	Valores baixos, com anomalia discreta da amplitude do sinal analítico.	Valores altos de Ke U	Anomalia condutiva discreta	Não apresentou assinatura característica na imagem pela técnica FPCS adaptada

5.6 – Geração do Modelo Prospectivo para Elementos do Grupo da Platina na Região de Serra Leste

O modelo aqui proposto é baseado no conhecimento atual do complexo máfico ultramáfico acamadado Luanga. Este complexo aflora em forma de uma cunha com direção predominante NE, com a extremidade sul flexionada para SW, indicando um arrasto dúctil destal desta unidade ao longo da Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento (ZCTC). Este arrasto está relacionado com a segunda fase de deformação regional (Figura 5.1).

O complexo Luanga é representado por uma unidade ultramáfica composta, da base para o topo, por camadas de serpentinitos (metadunitos e metaperidotidos), metapiroxenitos, metanoritos e cromititos intercalados; e por uma unidade máfica composta por metaleucogabros e anortositos, onde também ocorrem camadas de cromitito e cromita disseminada nos metaleucogabros, próximo ao contato com as camadas de cromitito (CVRD, 2002). As rochas que compõem a unidade ultramáfica caracterizam-se por apresentar grande quantidade de magnetita, concentrada predominantemente nos serpentinitos, metadunitos e metaperidotitos,

formada a partir da desestabilização de olivina (olivina => serpentina + magnetita). O acamamento magmático apresenta caimento de aproximadamente 50° para SE na porção Sul do Complexo, e aproximadamente 70° para Leste na porção Norte do complexo, onde as camadas assumem direção NNW. A unidade ultramáfica ocorre sobreposta à unidade máfica, provavelmente devido à inversão da estratigrafia original, provocada por rejeitos oblíquos, na Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento (ZCTC), ocorridos durante a segunda fase de deformação regional (CVRD, 2002).

A mineralização de EGP está hospedada em três tipos de rochas: (i) em um nível sulfetado (pirrotita, pentlandita, milerita, etc.) que ocorre dentro da camada de piroxenitos, (ii) nas camadas de cromitito, que ocorrem nas unidades ultramáfica e máfica, geralmente próximo ao contato entre essas unidades e (iii) em clorita-anfíbólio (tremolita-actinolita)-talco xistos, formados a partir da milonitização das rochas ultramáficas. A mineralização principal está relacionada ao nível sulfetado que ocorre encaixado no pacote de piroxenitos e é de origem singenética. A mineralização hospedada nos clorita-anfíbólio-talco xistos é epigenética - essas rochas representam os equivalentes deformados do pacote ultramáfico. A mineralização associada aos níveis de cromitito é subordinada e de origem singenética (CVRD, op.cit.).

Os fatores discriminados a seguir formam as evidências utilizadas na integração de dados utilizados neste trabalho:

- (i) setores com valores baixos no canal do tório da gamaespectrometria (<10 cps) são relacionados à ocorrência de rochas máficas e ultramáficas, que hospedam as mineralizações de EGP primárias;
- (ii) a presença de anomalias da amplitude e da fase do sinal analítico do campo magnético anômalo são devidas ao expressivo conteúdo de magnetita nas rochas máficas e ultramáficas;
- (iii) as rochas ultramáficas truncadas por zonas de cisalhamento sofrem alterações mineralógicas, tornando-se particularmente ricas em talco, serpentina, tremolita (e seus produtos intempéricos), e hospedam mineralizações de EGP. Essas zonas e adjacências produzem uma assinatura típica nas imagens do ETM plus, através do uso da técnica FPCS, nas bandas 1, 3, 4 e 5, onde estas rochas são destacadas por uma coloração esbranquiçada.

Com base nestes fatores foi possível elaborar um modelo prospectivo preliminar para EGP, aplicável à região de Serra Leste, baseado na assinatura geofísica (gamaespectrometria e magnetometria), multiespectral e textural dos metalotectos relacionados a essas mineralizações.

Através de uma análise espacial simples, feita com o auxílio do sistema ArcView 3.2, observando os critérios e controles da mineralização apresentados anteriormente, foi possível elaborar um mapa sugerindo áreas favoráveis à prospecção de EGP, para detalhamento dos trabalhos de prospecção através de geoquímica de solo e de métodos de amostragem direta (poços, trincheiras e sondagem).

Para a elaboração deste mapa, o primeiro passo foi a criação de um mapa com os contornos delimitando áreas com valores inferiores a 10 cps no canal do tório da gamaespectrometria, que representam as áreas de afloramento dos complexos máficos e ultramáficos. O passo seguinte foi lançar neste mapa os eixos interpretados das anomalias da amplitude e a fase do sinal analítico, que representam as áreas de ocorrência de rochas ultramáficas (ricas em magnetita) e das zonas de cisalhamento, que invariavelmente remobilizam magnetita e EGP das rochas ultramáficas. A seguir, foram criados *buffers* (zonas tampão) em torno dos eixos interpretados da amplitude e da fase do sinal analítico, que representam as unidades ultramáficas e as zonas de cisalhamento que truncam as rochas ultramáficas. Foram gerados três *buffers*, com 200 metros cada, delimitando áreas de 600 metros em torno dos eixos das anomalias magnéticas (Figura 5.2), excetuando-se aquelas que representam os diques gabróicos Neoproterozóicos.

O passo final foi a elaboração de um mapa mostrando os setores de intersecção entre as áreas dos *buffers* em torno das anomalias magnéticas, com as áreas representadas por valores baixos no canal do tório da gamaespectrometria (Figura 5.3). Esses setores foram classificados como ‘prioridade 1’ para a prospecção de EGP e representam as áreas de ocorrência das rochas ultramáficas e das zonas de cisalhamento que truncam essas rochas, principais hospedeiras da mineralização de EGP no complexo Luanga. Os setores definidos como ‘prioridade 2’ representam as áreas de afloramentos das unidades máficas dos complexos máfico-ultramáficos acamadados, que também hospedam mineralizações de EGP no complexo Luanga, mas em menor grau de importância.

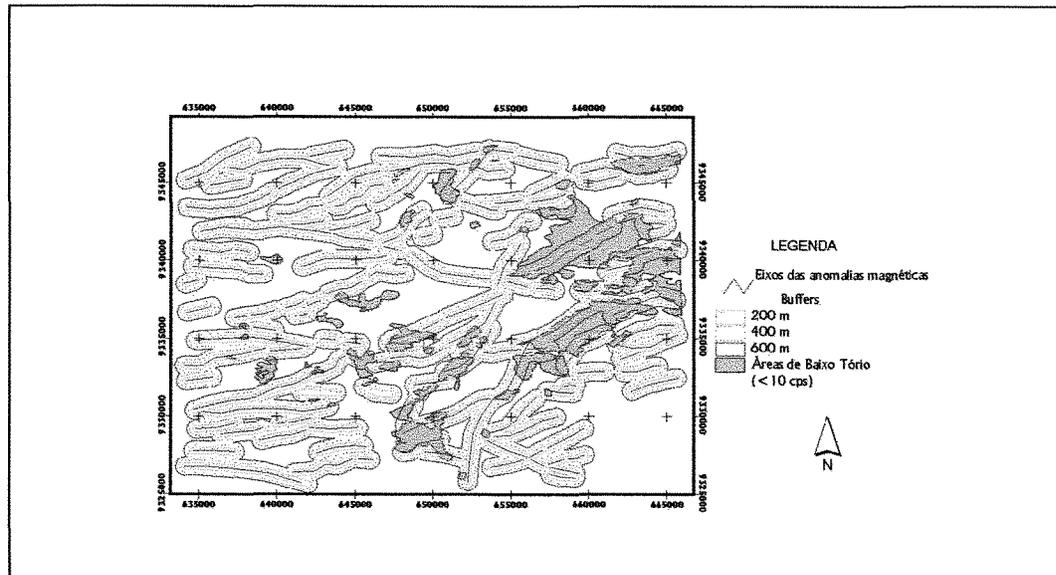


Figura 5.2 – Mapa ilustrando a criação de buffers em torno dos eixos magnéticos interpretados das anomalias da amplitude e da fase do sinal analítico do campo magnético anômalo.

Considerando o resultado apresentado na Figura 5.3, as áreas sugeridas como favoráveis para a prospecção de mineralizações de EGP, na região de Serra Leste, perfazem 53,23 km², o que representa 7,43% da área total estudada (716 Km²). Esta redução contribui para a redução dos gastos com trabalhos de detalhe, como por exemplo, os levantamentos geoquímicos de solo e geofísica terrestre.

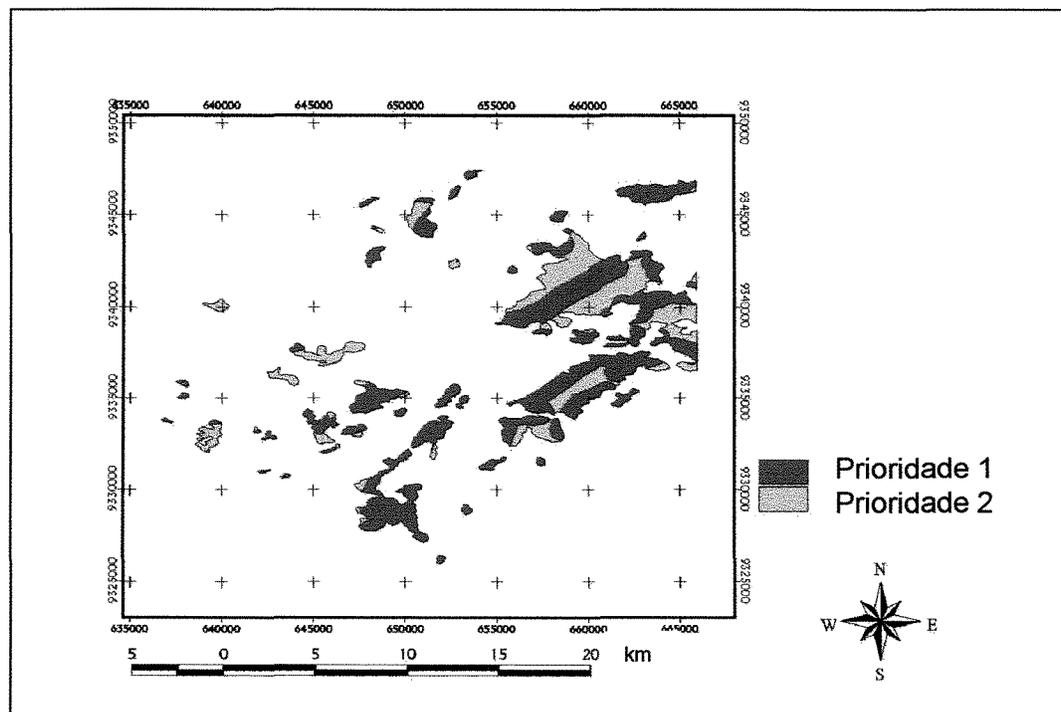


Figura 5.3. Mapa de favorabilidade para a prospecção de elementos do grupo da platina (EGP), na região de Serra Leste, Província Mineral de Carajás, PA.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Os dados aereogeofísicos e de sensoriamento remoto da região de Serra Leste mostram uma visão sinóptica da distribuição e configuração espacial das unidades litológicas e estruturas tectônicas. Os procedimentos de realce destes dados geraram informações importantes sobre a geologia da área, contribuindo sobremaneira com o mapeamento geológico. Vale ressaltar que, mais uma vez, o levantamento geofísico aéreo de alta resolução demonstrou ser uma ferramenta ímpar para mapeamento geológico e prospecção mineral dessas áreas, pois minimiza a aquisição de dados de campo, permite a elaboração de produtos consistentes em áreas com poucos afloramentos, em tempo mais reduzido.

Com relação aos resultados do processamento dos dados geofísicos, em geral, é importante estar atento ao método empregado para a interpolação dos dados, de forma a evitar a criação de artefatos indesejáveis, e principalmente, a supressão de anomalias discretas paralelas ou em direções próxima a das linhas de vôo. Esse fato foi verificado no caso das anomalias relacionadas ao diques de gabro com magnetita, neoproterozóicos, orientados NNW, portanto, quase paralelos às linhas de vôo. A resposta magnética desses diques é suprimida com a utilização do método de interpolação bi-direcional, mas fica clara quando utilizado o algoritmo da mínima curvatura. O uso da técnica do micronivelamento proporcionou excelentes resultados na remoção de anomalias espúrias ao longo das linhas de vôo, para os dados de todos os métodos geofísicos utilizados, reduzindo o ruído da imagem, facilitando a interpretação.

Com relação aos realces aplicados aos dados magnetométricos, o uso da amplitude e da fase do sinal analítico mostraram-se mais eficientes para o mapeamento de corpo tabulares com mergulho alto (diques e camadas), em contraste com a derivada vertical e o gradiente horizontal. As imagens do sinal analítico permitiram o mapeamento de algumas das grandes unidades litoestratigráficas regionais, como os complexos máfico ultramáficos acamadados, os diques gabróicos Neoproterozóicos e algumas formações ferríferas. A presença de subdomínios que indicam unidades litológicas, com características diferentes dentro de uma mesma unidade litoestratigráfica, permitiu a identificação de camadas de metaperidotitos e serpentinitos nos complexos máficos ultramáficos acamadados. Esses dados também possibilitaram a cartografia de estruturas, como zonas de falhas e cisalhamentos.

A análise das soluções de Euler mostrou que estas representam a forma e a profundidade das fontes das anomalias magnéticas.

Na região de Serra Leste, bem como, em toda a porção oriental da província Carajás a Leste do Rio Parauapebas, a mata original foi substituída por pastagens e a morfologia do terreno é marcada por superfícies arrasadas. Esses fatores contribuem para que a resposta gamaespectrométrica represente as unidades litológicas, e não acúmulos devido a transporte de massa relacionado a processos de intemperismo e erosão.

Sobre os realces aplicados aos dados gamaespectrométricos, a imagem ternária dos canais do potássio, do urânio e do tório, mostrou-se uma excelente ferramenta no apoio ao mapeamento das principais unidades litológicas. A imagem ternária possibilitou ainda a identificação de subdomínios de enriquecimento relativo em potássio, urânio e tório, relacionado granitogênese e atividade hidrotermal, não perceptíveis através da análise de imagens ou mapas dos canais gamaespectrométricos individuais.

Existe ainda uma interessante relação entre os domínios gamaespectrométricos e ‘unidades geocronológicas’ na região de Serra Leste. O embasamento Arqueano, com idades superiores a 2,9 Ga, possui valores altos da contagem total da radiação gama. As suites graníticas Estrela e Cigano, com idades 2,55Ga e 1,88 Ga, respectivamente, são perfeitamente diferenciadas na imagem ternária devido ao enriquecimento em potássio em relação ao urânio e o tório. Os granitos anorogênicos (1,88 Ga) caracterizam-se por valores altos e relativamente proporcionais para K, U e Th.

Os dados eletromagnéticos indicaram a presença de uma série de corpos condutores distribuídos pela área. Esses condutores estão relacionados à presença de concentrações metálicas de natureza diversa. Os sistemas eletromagnéticos têm sido uma ferramenta extremamente útil na identificação de sulfetos maciços, formações ferríferas e manganésíferas e outros corpos condutores. Entretanto, a interpretação dos dados de sistemas eletromagnéticos como o GEOTEM, requer um consistente modelo geológico e a verificação no terreno. Em algumas situações, a resposta está diretamente relacionada ao alvo pretendido, em outras pode estar relacionada a coberturas condutivas profundas, ricas em argilo-minerías (Gingerich & Schaefer, 1998).

Com relação aos realces aplicados às imagens dos sensores remotos, as técnicas utilizadas possibilitaram a identificação feições do relevo relacionadas a elementos estruturais e contatos litológicos, com uma resolução espacial que permite tanto a análise em escala regional até aquela de semi-detalhe. Os produtos integrados dos dados geofísicos com as imagens de sensores remotos foram eficientes na função de adicionar feições do relevo aos dados geofísicos, facilitando a interpretação dos lineamentos e dos domínios litológicos.

Os métodos de processamento digital e análise integrada dos dados de geologia, geofísica e de sensoriamento remoto aplicadas neste trabalho, permitiram:

* a determinação das profundidades médias das anomalias magnéticas, com base na análise do espectro de potência da intensidade do campo magnético anômalo. Essas anomalias aparecem entre 300 e 400 metros para as profundidades intermediárias; e 1000 metros para as profundidades maiores. A análise das soluções de Euler possibilitou a confirmação das profundidades, da forma e da localização das anomalias magnéticas, indicando profundidades de 300 a 500 metros e formas tabulares para as fontes localizadas nos complexos máfico ultramáficos. Isso mostra que as rochas ultramáficas magnéticas não ultrapassam essas profundidades e indica profundidades de 500 à 1000 metros e formas esféricas ou cilíndricas para as fontes das anomalias localizadas sob o depósito de ferro Serra Leste e das formações ferríferas que ocorrem na porção centro Norte da área.

* a correlação da resposta dos eixos das anomalias da amplitude e da fase do sinal analítico com áreas de ocorrência de rochas ultramáficas ricas em magnetita (dunitos, peridotitos e serpentinitos) e de zonas de cisalhamento, onde houve remobilização de magnetita, ambas mineralizadas em EGP, no depósito do Luanga;

* a correlação da resposta de valores baixos do canal do tório da gamaespectrometria (<10 cps), com áreas de ocorrências de rochas máficas e ultramáficas, hospedeiras de mineralizações de EGP na área em estudo.

* a identificação de domínios condutivos até a profundidade de 300 a 400 metros (ie., limite de detecção do sistema GEOTEM), coincidentes com áreas de afloramentos de rochas dos complexos máfico ultramáficos conhecidos. Esses domínios são marcados pela resposta das unidades ultramáficas ricas em magnetitas e das formações ferríferas do Grupo Grão Pará;

* a correlação da resposta de altos valores gamaespectrométricos com áreas de ocorrência de rochas graníticas na região, em suas duas gerações: a Suíte Estrela, Arqueana (2.5 Ga.) e a suíte representada pelo Granito Cigano (e apófises relacionadas), Paleoproterozoica (1.8 Ga).

* a identificação dos principais lineamentos que definem a compartimentação tectônica da região de Serra Leste, caracterizados: (i) pela remobilização dos elementos identificados pela gamaespectrometria, posicionados ao longo de estruturas que compreendem o Splay Divergente de Serra Pelada (HTSSP); (ii) e pelo deslocamento de unidades litoestratigráficas com assinatura gamaespectrométrica definida, caracterizadas por arrastos dúcteis ao longo dos principais corredores estruturais, principalmente na Zona de Cisalhamento Transcorrente Cinzento.

* elaborar um modelo prospectivo para elementos do grupo da platina (EGP), baseado na integração de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto, aplicável à região de Serra Leste.

Referências Bibliográficas

- Akima, H. - 1970 – A new method of interpolating and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the Association of Computing Machinery*, 17(4), 589-602.
- Araújo, O.J.B.; João, X.S.J.; Costa, J.B.S. - 1988 – A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás. In SBG, Congresso Latino-Americano de Geologia, 7, Belém, Anais, 1: 328-338.
- Araújo, O.J. & Maia, R.G.N. - 1991- Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Serra dos Carajás, Folha SB22-Z-A, Estado do Pará. Texto Explicativo. Brasília, *DNPM/CPRM*, 164p.
- Barros, C.E.M. & Barbey, P. – 1998 – A importância da granitogênese tardi-arqueana (2,5 Ga.) na evolução tectono-metamórfica da província mineral de Carajás – O Complexo Granítico Estrela e sua auréola de contato. *Rev. Bras. Geociências*. 28(4),: 513-522.
- Barros, C.E.M.; Dall’Agnol, R.; Barbey, P.; Boullier, M. – 1997 – Geochemistry of the Estrela Granite Complex, Carajás, Region, Brazil: an example of archean A-type granitoid. *Journal of South American Earth Sciences*, 10 (3-4): 321-330.
- Blakely, R.J. - 1995 – Gravity & Magnetic Applications. Cambridge University Press, 441p.
- Blum, M.L.B. – 1999 – Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Tese de Doutouramento, 113p.
- Brigs, I.C. – 1974 – Machine countouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39 (1), 38-48.
- CPRM – 1994 – Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Serra Pelada, Folha SB22-X-C, Estado do Pará, Brasília, *CPRM*, 220p.
- Cripen, R.E., 1989, Selection of Landsat TM band and band-ratio combinations to maximize lithologic information in color composite displays. In: Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Vol. II, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Mich., pp.917-921.
- Crósta, A.P. 1992. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas-Instituto de geociências, Universidade de Campinas, 170p..

- Crósta, A.P. & Moore, J.McM, 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. In: 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, *Proceedings*, Calgary, Canada, 2:1173-1187.
- Dall'Agnoll, R; Vieira, E.A.P.; Sá, C.A.S.; Medeiros. H. de; Gastal, M.C.P.; Teixeira, N.P. – 1986– Estado atual do conhecimento sobre as rochas granitóides da porção sul da Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geociências*, SBG, v. 16, n.1, 11-23.
- Dardene, M.A., Ferreira Filho, C.F.; Meireles, M.R. – 1988 – The role of shoshonite and calc-alkaline suites in the tectonic evolution of thje Carajás district, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 1:363-372.
- Diella, V.; Ferrario, A.; Girardi, V. – The Luanga Mafic-ultramafic complex in Serra dos Carajás (Pará State, Brasil): A PGM-rich intrusion. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. *Docegeo/CDI*, relatório interno (inédito): 15.
- Docegeo - 1988 – Revisão Litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In:SBG, *Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Belém, Anais/Anexo: 11-56.
- Docegeo – 1995 – Alvo Serra Leste – Relatório de Etapa – *Departamento de Pesquisa – Distrito Amazônia* – Relatório Interno (Inédito): 150p.
- Docegeo – 1984 – Projeto Cobre Carajás-Pojuca. Relatório de Pesquisa. *Rio Doce Geologia e Mineração, Distrito Norte* , Belém, 4V.
- Drury, S.A. 2001. *Image Interpretation in Geology*, Third edition, Blackwell Science (London), 290p.
- Farias, N.F. & Saueressig, R. - 1982 – Jazida de Cobre Salobo 3A. In: SBG, Simp. Geol. da Amazônia, 1, Belém, In: SBG/NO, *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1, Belém, Anais: 61-73.
- Ferreira Filho, C.F. – 1985 – Mineralizações Sulfetadas do Prospecto Bahia, Província Mineral Carajás. Inst. De Geociências, *Universidade de Barasília*, Brasília, Dissertação de Mestrado, 112p.
- Fuck, R.F. – 2000 – Interpretação de dados magnetométricos, eletromagnetométricos e gamaespectrométricos da região central da Serra dos Carajás, PA Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 185p.

- Gibbs, A.K.; Wirth, K.R.; Hirata, W.K.; Olzewski Jr., W.J. – 1986 – Age and Composition of the Grão Pará Group Volcanics, Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geociências*, 16 (2): 201-211.
- Gingerich, J. & Schaefer, M.J. – 1998 - The evolution of airborne time domain electromagnetic applications for geologic mapping; a Noranda perspective. *Exploration Geophysics*.29, 204-210.
- Geomag – 1993 – Levantamento aéreo magnetométrico, gamaespectrométrico e eletromagnetométrico nas áreas Serra Pelada/Rio Novo e Almas (TO), Relatório final de aquisição, processamento e interpretação de dados, v1 Texto Técnico,71p.
- Grainger, C.J.; Groves, D. I.& Costa, C.H.C. – 2001 – The epigenetic sediment-hosted Serra Pelada Au-PGE Deposit and its potential genetic association with Fe-oxide Cu-Au mineralization within the Carajás Mineral Province, Amazon Craton, Brazil. Society of Economic Geology, (no prelo).
- Gunn, P.J. & Dentith, M. – 1997 – Magnetic responses of mineral deposits. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*. 17(2).
- Jorge João, X. da S.; Neves, A.P.; Leal, J.W.L. – 1982 – Ouro da Serra Pelada, aspecto da geologia e garimpagem. In: SBG, *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1, Belém, Anais: (2) 52-61.
- Hirata, W.K.; Rigon, J.C.; Kadekaru, K.; Cordeiro, A.A.C.; Meireles, E.M. – 1982 – Geologia Regional da Província de Carajás. In: SBG, *Simp. Geol. da Amazônia*, 1, Belém, In: SBG/NO, *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1, Belém, Anais: 100-110
- Hitzmann, M.W.; Oreskes, N.; Einaudi, M.T. – 1992 – Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*. 58:241-287.
- Holdsworth, R.E. & Pinheiro, R.V.L. – 2000 – The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology* 22:1105-1123.
- Hsu, S.K.; Sibuet, J.C.; Shyu, C.T. 1996 – High-resolution detection of geological boundaries from potential-field anomalies: an enhanced analytical signal technique. *Geophysics*, 61(2):373-386.

- Huhn, S.R.B.; Macambira, M.J.B.; Dall'Agnoll, R. – 1999 - Geologia e Geocronologia Pb-Pb do granito alcalino arqueano Planalto, região de Serra do Rabo, Carajás – PA . In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 6, Manaus, Anais: 463-466.
- Huhn, S.R.B. & Nascimento, J.A.S. - 1997 – São os depósitos cupríferos de Carajás do tipo Cu-Au-U-ETR? In: Costa , M.L. & Angélica, R.S(coord.) *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém, FINEP & SBG/NO, 143-160.
- Huhn, S.R.B.; Soares, A.D.V.; Souza, C.I.J.; Albuquerque, MAC.; Leal, E.D.L.; Masotti, F.S. & Brustolin, V. – The Cristalino Copper Gold Deposit, Serra dos Carajás, Pará. In: SBG, *International Geological Congress*, 31, Rio de Janeiro, resumos.
- Lancaster Oliveira, J.; Fanton, J.; Almeida, A.J.; Leveille, R.A.; Vieira, S – 2000 – ~~Discovery and geology of the Sossego Copper-Gold Deposit, Carajás District, Pará~~ State, Brazil. In: SBG, *International Geological Congress*, 31, Rio de Janeiro, resumos.
- Livingstone, C.E., Gray A.L., Hawkins, R.K. and Olsen, R.B. - 1988 - CCRS C/X – airborne Synthetic Aperture Radar: An R andD Tool for the ERS-1 Time Frame, IEEE AES Magazine, 11-16.
- Liandrat, E. – 1972 – Reconhecimento ao longo dos rio Itacaiunas e Parauapebas, município de Marabá, Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 34, n. 1, 165-184.
- Lindenmayer, Z.G.; Laux, J.H. e Viero, A.C. – 1995 – O papel da alteração hidrotermal nas rochas da Bacia de Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*, 7: 125-145.
- Lindenmayer, Z.G.; Fyfe, W.S., Machado, N. – 1989 – Depósito do Salobo: efeitos do metamorfismo e metassomatismo sobre a mineralização. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Belém, Resumos, 103.
- Loughlin, W.P. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57 (9): 1163- 1169.
- Luyendyk, A .P.J- 1997 – Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2):31-38.
- Macambira, J.B.; Ramos, J.F.F.; Assis, J.F.P.; Figueiras, A.J.M. – 1990 – Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca: Relatório Final, Belém, *UFPA/Centro de Geociências*, 150p.

- Nogueira, A.C.R.; Truckenbrodt, W.; Pinheiro, V.L. – 1995 – Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescricao e redefinição litoestratigráfica. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra, 7: 177-197.
- Oliveira, C.G.; Tazava, E.; Tallarico, F.H.B.; Santos, R.V.; Gomes, C. – 1988- Gênese do depósito de Au-Cu-(U-ETR) de Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás. In: SBG, *Congr. Bras. Geologia*, 40, Belo Horizonte, Anais: 137.
- Paradela, W.R.; Bignelli, P. A .; Veneziani, P.; Pietsch, R.W.; Toutin, T. – 1997 – Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma-ray spectrometry for geological mapping in a tropical rain forest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. *International Journal Remote Sensing*, 18(7):1483-1501.
- Pinheiro, R.V.L. & Holdsworth, R.E. – 1997 – Reactivation of archaean strike slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society*, 154: 99-103.
- Projeto Radam – 1974 – Folha SB22 – Araguaia e parte da Folha SC22 – Tocantins; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. In: CPRM – 1994 – *Programa de Levantamentos Básicos do Brasil – Folha Serra Pelada*, CPRM, 220p.
- Rencz, A .N. –1999 – Remote Sensing for the Earth Sciences>>>>>
- Roest, W.R.; Verhoef, J.; Pilkington, M. – 1992 – Magnetic interpretation using 3-D analytical signal. *Geophysics*, 57 (1): 116-125.
- Sabins, F.F. – 1999 – Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14:157-183.
- Sachs, L.L.B.;Batista, J.J.; Figueiredo, B.R., - 1993 – The Igarapé Bahia deposit district of Carajás, Northern Brazil: Hydrothermal alteration and mineralization. In: SBG, IV Congress. Bras. Geol.. 183.
- Sillitoe, R.H. & Bonham, H.F. Jr. - 1990 - Sediment-hosted gold deposits: Distal Products of magmatic-hydrothermal systems. *Geology* 18, 157-161.
- 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 da Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Tese de doutoramento.195p.
- Spector, A . & Grant, F.S. – 1970 – Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): 293-392.

- Siqueira, J.B. – 1996 – Aspectos lito-estruturais e controle das mineralizações do depósito Salobo 3A. Tese de doutorado, *Universidade Federal do Pará*, Belém, 157p.
- Saueressig, R. – 1988 – Depósito de cobre e zinco Corpo Quatro Pojuca. . In: SBG, *Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Belém, Anais/Anexo: 115-122.
- Soares, A.D.V.; Ronzê, P.C.; Santos, M.C.G.; Leal, E.D. & Barreira, C.F. – 2000 – Geology of the Alemão Copper-Gold Deposit. In: SBG, *International Geological Congress*, 31, Rio de Janeiro, resumos.
- Smith, R.S.& Keating, P.B. – 1996 - The usefulness of multicomponent, time-domain, airborne eletromagnetic measurements. *Geophysics*,61(1):74-81.
- Sabins, F.F. – 1999 – Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14:157-183.
-
- Suíta, M.T.deF.- 1996 – Geoquímica e metalogenia de elementos do grupo da platina (EGP+Au) em complexos máfico-ultramáficos do Brasil: critérios & guias com ênfase no complexo Máfico-ultramáfico Acamadado de Alto Grau Barro Alto (CBA, Goiás) – 1996 – Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.410.
- Tallarico, F.H.B., Oliveira, C.G.; Figueiredo, B.R. – 2000 – The Igarapé Bahia Cu-Au mineralization, Carajás Province. *Revista Brasileira de Geociências*. 30(2):230-233.
- Tallarico, F.H.B., Coimbra, C.R.; Costa, C.H.C. & Oliveira, C.G.; – 2000 – The Serra Leste Sediment-hosted Au-(Pd-Pt) Mineralization, Carajás Province. *Revista Brasileira de Geociências*. 30(2):226-229.
- Thompson, D.T.-1982 – EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47,37-37.
- Thompson, J.F.H., Sillitoe, R.H.; Baker, T.; Lang, J.R.; Mortensen, J.K. – 1999 – Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*. 34:323-334.
- Valarelli, J. et al.- 1978 – Aspectos genéticos do minério de manganês do Azul. In: SBG, Congress. Bras. Geologia, 30, Recife, *Anais*: 1670-1679.
- Veneziani, P. & Okida, R. – 2001- Mapeamento geológico - estrutural da região do Projeto Platina (Serra Pelada) baseado em dados integrados RADARSAT-TM – Aerogefísica. Relatório Técnico (Inédito): 52p.

- Vieira, E.A.P; Saueressig, R.; Siqueira, J.B., Silva, E.R.P, Rego, J.L., Castro, F.D.C. – 1988 – Caracterização geológica da jazida polimetálica do Salobo 3^A: Reavaliação. In: SBG, *Congresso Brasileiro de Geologia*, Belém, 1, 97-111.
- Williams, P.J. & Pollard, J. – 1998 – Fe Oxide-Copper-Gold Deposits (The Candelaria,- Ernest Henry-Olympic Dam Family). *Short Course Notes*. James Cook Univesity. Townsville.
-