UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

ANTONIO HENRIQUE DANTAS DA GAMA PENTEADO

AVALIAÇÃO DO CONTEÚDO ESPECTRAL DAS BANDAS GEOSCAN (MKII) NO AUXÍLIO À PESQUISA AURÍFERA NA PORÇÃO SUL DO *GREENSTONE BELT* DO RIO ITAPICURU - BAHIA.

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

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Antonio H.D.G. Penteado e aprovada pela Comissão Julgadora em 14/04/1999.

ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

JANEIRO- 1999

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

ANTONIO HENRIQUE DANTAS DA GAMA PENTEADO

AVALIAÇÃO DO CONTEÚDO ESPECTRAL DAS BANDAS GEOSCAN (MKII) NO AUXÍLIO À PESQUISA AURÍFERA NA PORÇÃO SUL DO *GREENSTONE BELT* DO RIO ITAPICURU - BAHIA.

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

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta / IG-UNICAMP
Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho / IG-UNICAMP

985216

CAMPINAS - SÃO PAULO

JANEIRO - 1999

UNICAMP

UNIDADE BC
N.º CHAMADA:
387a
V. Ex.
TOMBO BC/ 37969
PROC 229/99
D [X]
PREÇO R$ 11,00
DATA 18/06/99
N.º CPD

CM-00124340-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA do I.G. - UNICAMP

Penteado, Antonio Henrique Dantas da Gama
P387a Avaliação do conteúdo espectral das bandas GEOSCAN (MKII) no auxílio à prospecção aurífera na porção sul do Greenstone Belt do Rio Itapicuru – Bahia / Antonio Henrique Dantas da Gama Penteado - Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientadores: Álvaro Penteado Crósta, Carlos Roberto de Souza Filho
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Processamento de Imagens – Técnicas Digitais. 2.Sensoriamento Remoto. 3. Ouro – Itapicuru, Rio (BA) I. Crósta, Álvaro Penteado. II.Souza Filho, Carlos Roberto III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

UNICAMP

AUTOR: **Antonio Henrique Dantas da Gama Penteado**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do Conteúdo Espectral das Bandas Geoscan (MKII) no Auxílio à Pesquisa Aurífera na Porção Sul do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru - Bahia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Aprovada em: 14 / 01 / 99

PRESIDENTE:

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta - Presidente

Prof. Dr. Roberto Perez Xavier

Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

Campinas,____ de_____de 1999

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

Avaliação do Conteúdo Espectral das Bandas Geoscan (MKII) no Auxílio à Pesquisa Aurífera na Porção Sul do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru - Bahia.

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANTONIO HENRIQUE DANTAS DA GAMA PENTEADO

O *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru (GBRI) tem sido alvo de vários estudos e pesquisas voltadas à exploração aurífera. Dentre os estudos realizados nessa região constou a utilização de sensoriamento remoto na caracterização de zonas de alteração hidrotermal, a partir de técnicas específicas e dos dados do sensor multiespectral de alta resolução Geoscan AMSS MK-II. Um dos problemas encontrados foi a presença de ruídos periódicos em várias de suas bandas, principalmente nas bandas do intervalo espectral correspondente ao infravermelho termal (TIR). Esta dissertação tem como um dos principais objetivos o desenvolvimento de técnicas para a remoção ou minimização destes ruídos com adoção das Transformadas de Fourier e sua aplicação às imagens Geoscan. Após a filtragem de ruídos das bandas termais as mesmas foram utilizadas, em conjunto com as demais bandas do sensor, na avaliação do uso potencial da informação espectral nelas contidas na caracterização das zonas de alteração hidrotermal. A área de estudo correspondeu à uma porção do GRBI localizada a sudoeste da cidade de Araci, Bahia. Como resultado deste estudo foram sugeridas novas alternativa de processamento dos dados e caracterizadas quatro faixas com anomalias espectrais características da presença de alteração hidrotermal, sendo duas destas correspondentes a potenciais sítios mineralizados. Uma dessas faixas representa uma continuidade da Faixa Weber, importante feição geológica onde se encontram algumas das mais importantes ocorrências auríferas conhecidas no GBRI, como por exemplo a mina de Fazenda Brasileiro.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

Avaliação do Conteúdo Espectral das Bandas Geoscan (MKII) no Auxílio à Pesquisa Aurífera na Porção Sul do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru - Bahia.

ABSTRACT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANTONIO HENRIQUE DANTAS DA GAMA PENTEADO

The Rio Itapicuru Greenstone Belt (GBRI) has been subject to several studies and exploration surveys for gold. In one of these studies, high spectral resolution remote sensing data generated by the airborne sensor Geoscan AMSS MK-II were used to characterize hydrothermal alteration areas. One of the main constraints found in the study was the presence of high amount of noise in some of the Geoscan bands, particularly in those from the thermal infrared portion of the electromagnetic spectrum. This dissertation aims to develop techniques for removing or minimizing the noise, through the use of Fourier Transforms, and to apply them to the Geoscan data. After the noise removal from the thermal bands, they were used in conjunction with the remaining bands of this sensor for the evaluation of the potential use of their spectral information for characterizing hydrothermal alteration zones. The study area corresponds to a portion of the GBRI located at southwest of Araci town, Bahia. As a result, new alternatives for processing these data were suggested and four areas containing spectral anomalies, characteristic of hydrothermal alteration, were identified, corresponding to potentially mineralized areas. One of these areas represents a continuation of the Weber Belt, an important geologic feature where some of the most significant gold occurrences are located, such as the Fazenda Brasileiro gold mine.

DEDICATÓRIA

"Dedico esta dissertação
à minha pequenina
Hannah Kris"

AGRADECIMENTOS

Com especial atenção, agradeço ao orientador Alvaro P. Crósta pelas orientações e por depositar confiança em momentos difíceis durante o todo o desenvolvimento desta dissertação. Também agradeço ao colega Carlos Roberto, que na condição de co-orientador foi de muita presteza.

Atenção especial também merece Márcio Anselmo Duarte Ferrari e Lícia Pignataro da Silva Porto pelo apoio e solidariedade que ambos me prestaram durante esta difícil fase que o mestrado representa.

Agradeço também a todos os professores, funcionários e colegas do Instituto de Geociências pelo convívio, nem sempre tão doce, e pela atenção desprendida em momentos de necessidade e de descontração.

Destaque merecem os colegas Hector, Zé Renato, Rodox, Casal Monge, Carrera, Tati, Guilherme, Carlinha, Cezar, Petain, Amadu, Zulu, Neivaldo, Sícoli, Blau-Blau, Mary Anne, Regla, Rigoberto, Ronaldo, Tissoca, Renato Bocão, Silvia Rolim, Marcelo Guitarrari, Patrícia, Irian, Carlos Tápia, Jorge, e até Pará e Lepricot, com quem tive o prazer de conviver ao longo destes três anos.

Á DOCEGEO pela liberação dos dados e apoio logístico durante a campanha de campo, ao LAPIG e LEG onde trabalhei a maior parte do tempo e ao CNPq pelo apoio monetário através da bolsa de estudo.

Aos meus pais, irmãos e parentes por esperarem com paciência por este dia especial.

Obrigado a todos vocês!

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação 1
1.2. Objetivos 3
1.3. Justificativas 4
1.4. Área de Estudo 7
1.4.1. Localização 7
1.4.2. Vias de Acesso 7
1.4.3. Fisiografia, Clima e Vegetação 7

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS GEOLÓGICOS DO GREENSTONE BELT DO RIO ITAPICURU

2.1 Geologia Regional 10
2.2. Contexto Geotectônico 12
2.3. Litoestratigrafia 13
2.4. Arcabouço Estrutural Regional 14
2.5. Metamorfismo 16
2.6. Geocronologia 17
2.7. Mineralizações Auríferas 18
2.8. Contexto Geológico Local 20
2.9. Discussão 22

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais 24
3.1.1. O Sensor Geoscan 24
3.1.1.1. O Aerolevantamento Multiespectral Sobre o GBRI 25
3.1.2. Processamento de Dados 26
3.1.3. Outros Materiais 27
3.2. Métodos 27
3.2.1. Estrutura de Desenvolvimento da Pesquisa 28
3.2.2. Estratégias para Pesquisa Aurífera no GBRI 29
3.2.3 Pré-processamento 32
3.2.4. Técnicas Usadas para o Processamento Digital de Dados Geoscan 35
3.2.4.1. Atividades Preliminares 35
3.2.4.2. Seleção de Principais Componentes por Feições Espectrais (FPCS) 35
3.2.4.3. O Realce por Decorrelação 36

CAPITULO 4 - A FILTRAGEM DE RUÍDOS EM IMAGENS GEOSCAN

4.1. Caracterização do Ruído 38
4.1.1 Domínio Espacial 38
4.1.2. Domínio de Frequências 39
4.1.3. Discussão das Análises 44

4.2. Avaliação de Métodos Existentes para Supressão de Ruídos 44
4.3. Novas Propostas Metodológicas 45
4.3.1. Metodologia I 46
4.3.2. Metodologia II 48
4.4. Desenvolvimento de Filtros Sintonizáveis 50
4.4.1. Filtro Sintonizável Quadrado 50
4.4.2. Filtro Sintonizável Circular 54
4.4.3. Filtro Sintonizável Circular com Gradiente de Atenuação 55
4.4.4. Operador Circular com Atenuante Gradacional 58
4.5. Filtragem das Bandas Termais 60
4.6. Discussão 62

CAPÍTULO 5 - PESQUISA AURÍFERA NO GREENSTONE BELT DO RIO ITAPICURU

5.1. O Sensoriamento Remoto e a Exploração Aurífera 64
5.2. Processamento Digital das Imagens Geoscan 65
5.2.1. Composições Coloridas RGB 65
5.2.2. Composições Coloridas RGB com Diferença de Bandas 68
5.2.3. Aplicação da técnica FPCS 71
5.2.3.1. Elaboração de Componentes Minerais 71
5.2.3.2. Definição de Novas Componentes Minerais 71
5.2.3.3. Composições Coloridas com as Componentes Minerais 79
5.2.4. O Realce por Decorrelação 80
5.3. Interpretação das Imagens Resultantes 84
5.4. Verificação de Campo 85
5.5. Discussão 86

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 89

APÊNDICE A – ATIVIDADES DE VERIFICAÇÃO DE CAMPO E ANÁLISES COMPLEMENTARES

A.1. Verificação de Campo 94
A.1.1. Atividades de Campo 94
A.1.2. Amostragens 95
A.1.3. Aspectos Gerais 96
A.2. Análises Complementares 97
A.2.1. Análise Petrográfica 97
A.2.2. Análise Química 99

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

ÍNDICE DAS FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Localização do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru (GBRI), Bahia. 9
Figura 1.2: Esquema generalizado do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru. 9
Figura 1.3: Mapa com as principais rodovias federais e estaduais. 9

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Geologia regional do Greenstone Belt do Rio Itapicuru . 11
Figura 2.2: Mapa geológico local. 23

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Esquema geral da organização de atividades da pesquisa. 29
Figura 3.2: Perfil geológico regional esquemático SW-NE da região de pesquisa. 30
Figura 3.3: Atividades orientadas à utilização dos dados Geoscan. 31
Figura 3.4: Esquema de representação dos domínios espacial e de frequência. 33
Figura 3.5: Distribuição das freqüências em espectro Fourier. 33
Figura 3.6: Etapas de filtragem de ruídos com o uso das Transformadas de Fourier. 34

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Bandas Geoscan 19 a 24 originais contendo ruído. 40
Figura 4.2: Representação das feições geométricas dos ruídos em PCs. 42
Figura 4.3: Espectro Fourier da Banda 19. 42
Figura 4.4: Histograma do espectro Fourier da banda 21. 42
Figura 4.5: Espectro Fourier das bandas 19 a 24. 43
Figura 4.6: Espectro Fourier da banda 21 com destaque para o ruídos. 43
Figura 4.7: Espectro Fourier da banda 21 e perfis estudados. 49
Figura 4.8: Perfil confeccionado sobre o espectro Fourier da banda 21. 49
Figura 4.9: Esquema da janela *Formula Editor* do ER Mapper. 52
Figura 4.10: Espectro Fourier da banda 21 e máscara correspondente. 53
Figura 4.11: Bandas 21 e 24 originais. e filtradas. 53
Figura 4.12: Máscara obtida com a aplicação do filtro sintonizável circular. 57
Figura 4.13: Atenuação gradacional de valores entre os dois círculos. 57
Figura 4.14: Espectro da banda 21 original, máscara e espectro após filtragem. 59
Figura 4.15: *Zoom* da área estudada. Imagens antes e após filtragem. 59
Figura 4.16: Espectros Fourier da banda 21 com ruído e após aplicação do operador circular zonal. 61

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Composição colorida RGB com as bandas Geoscan 3,2,1. 69
Figura 5.2: Composição colorida RGB com as bandas Geoscan 6,14,20. 69
Figura 5.3: Composição colorida RGB com as bandas Geoscan 23,17,3. 69
Figura 5.4: Composição colorida RGB com as bandas Geoscan 17,8,2. 69
Figura 5.5: Composição colorida RGB com bandas Geoscan 20,21,22 com as principais drenagens e lineamentos estruturais em destaque. 70
Figura 5.6: Composição colorida RGB com as componentes (2-1), (3-2) e (6-8). 70
Figura 5.7: Composição colorida RGB com as componentes (6-7),(6-8),(6-9). 70
Figura 5.8: CMs dos minerais hematita, limonita e goetita. 74
Figura 5.9: CMs para os minerais calcita/clorita/epidoto, sericita/caolinita e sílica. 74
Figura 5.10: Curvas espectrais de minerais e posicionamento das bandas Geoscan. 77

Figura 5.11: CMs propostas para os minerais calcita, clorita e epidoto 78
Figura 5.12: CMs propostas para os minerais caolinita e sericita (duas CMs) 78
Figura 5.13: Composições colorida: RGB com diferentes CMs. 80
Figura 5.14: Curvas espectrais dos minerais quartzo, clorita, sericita e calcita em relação às bandas termais do Geoscan. 82
Figura 5.15: Composição colorida RGB das bandas 20, 21 e 22 antes e após aplicação do realce por decorrelação. 82
Figura 5.16: Composição colorida RGB das bandas 19, 20 e 23 antes e após aplicação do realce por decorrelação. 83
Figura 5.17: Composição colorida RGB das bandas 24, 19 e 22 antes e após aplicação do realce por decorrelação. 83
Figura 5.18: Composição RGB das bandas 20,21,22 e a discriminação das principais faixas anômalas que indicam a ocorrência de alteração hidrotermal 87
Figura 5.19: Composição RGB 3,2,1 com a delimitação das faixas com alteração hidrotermal e dos alvos com potencial de portar mineralizações auríferas 88

APÊNDICE - A

Figura A.1: Mapa local com estradas principais secundárias e limites de propriedade 98
Figura A.2: Mapa de pontos de caminhamento sobre composição RGB 3,2,1. Pontos Norte em vermelho e Pontos Sul em azul. 98
Figura A.3: Mapa de drenagens extraídas da composição RGB 20, 21 e 22. 98
Figura A.4: Mapa de lineamentos extraídos da composição RGB 20, 21, 22. 98
Figura A.5: Mapa com os pontos amostrados para petrografia e análise química. 100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Configuração das 24 bandas Geoscan no aerolevantamentos do GBRI. 26
Tabela 3.2: Modelo para definição das anomalias características dos produtos de sensoriamento remoto adequados à exploração de depósitos auríferos em sistemas de veios e exalações hidrotermais. 31

Tabela 5.1: Relação de bandas Geoscan utilizadas na confecção de CMs 72
Tabela 5.2: Autovetores das bandas 1, 6, 7 e 12 para a CM da hematita. 72
Tabela 5.3: Autovetores das bandas 1, 6, 8 e 12 para a CM da limonita. 72
Tabela 5.4: Autovetores das bandas 1, 6, 9 e 12 para a CM da goetita. 72
Tabela 5.5: Autovetores das bandas 1, 8, 12 e 18 para a CM do grupo calcita, clorita e epidoto. 73
Tabela 5.6: Autovetores das bandas 1, 8, 11 e 15 para CM do grupo caolinita e sericita. 73
Tabela 5.7: Autovetores das bandas 1, 10, 20 e 23 para a CM da sílica. 73
Tabela 5.8: Relação das bandas utilizadas para a composição de novas CMs 75
Tabela 5.9: Autovetores das bandas 1, 8, 12 e 18 para a CM da calcita. 75
Tabela 5.10: Autovetores das bandas 13, 18, 19 e 22 para a CM da clorita. 76
Tabela 5.11: Autovetores das bandas 1, 8, 13 e 18 para a CM do epidoto. 76
Tabela 5.12: Autovetores das bandas 1, 8, 11 e 15 para a CM da caolinita. 76
Tabela 5.13: Autovetores das bandas 8, 11, 15 e 22 para a CM da sericita. 76
Tabela 5.14: Autovetores das bandas 11, 15, 19 e 22 para a CM da sericita. 76

Tabela A.1: Relação dos pontos com teor em Au maior que 10 ppm. 100

ÍNDICE DAS FOTOS

Foto A.1: Microfotografia de rocha gnaissica com textura granular. 101
Foto A.2: Microfotografia de rocha gnaissica com venulações com óxidos e hidróxidos de ferro e carbonatos. 101
Foto A.3: Microfotografia de rocha com textura protomilonítica. 101
Foto A.4: Microfotografia de rocha gnáissica rica em turmalinas. 101
Foto A.5: Microfotografia de rocha com textura milonítica. 102
Foto A.6: Microfotografia de rocha com textura protomilonítica com fenoclastos de plagioclásio e opacos euhedrais. 102
Foto A.7: Microfotografia de rocha com textura microconglomerática. 102
Foto A.8: Microfotografia de microconglomerado com enriquecimento em sericita, muscovita, quartzo e clorita. 102
Foto A.9: Microfotografia de rocha protomilonítica rica em minerais opacos euhedrais a subhedrais. 103
Foto A.10: Microfotografia de protomilonito com destaque para piritas transformadas em clorita e epidoto. 103
Foto A.11: Microfotografia de rocha com textura milonítica com clorita, sericita, quartzo e carbonato cortada por veios dicordantes de carbonato e quartzo. 103
Foto A.12: Microfotografia de rocha milonítica cortada por veios com quartzo e carbonato, clorita e óxidos e hidróxidos de ferro. 103
Foto A.13: Microfotografia de protomilonito com destaque para minerais opacos em trilhas paralelas à foliação. 104
Foto A.14: Microfotografia de milonito com shear-bands tipo C e opacos microcristalinos em trilhas paralelas à xistosidade da rocha. 104
Foto A.15: Microfotografia de protomilonito com piritas subhédricas fraturadas. 104
Foto A.16: Microfotografia de gnaisse com destaque para os únicos opacos enontrados. 104

ÍNDICE DAS LISTAGENS

Listagem 4.1: Listagem da macro para elaboração de um filtro sintonizável quadrado e a máscara correspondente. 52
Listagem 4.2: Listagem da macro para elaboração de um filtro sintonizável circular e a máscara correspondente. 54
Listagem 4.3: Listagem da macro para elaboração de um filtro sintonizável gradacional circular e a máscara correspondente. 58
Listagem 4.4: Listagem da macro do operador sintonizável circular gradacional. 61

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O sensoriamento remoto (SR) tem sido largamente empregado no levantamento de informações geográficas, geológicas e ambientais. Os aspectos do sensoriamento remoto relacionados à geologia são direcionados principalmente ao mapeamento litológico de grandes áreas ou áreas de difícil acesso, ao levantamento do arcabouço estrutural e também na exploração de minerais de interesse econômico.

As aplicações geológicas do SR têm sido desenvolvidas com ênfase em regiões áridas, com considerável exposição de rochas e sem cobertura vegetal, ou em regiões temperadas, com cobertura vegetal discreta e camada pouco espessa de rochas intemperizadas. A presença de vegetação e espessas coberturas de solos e rochas alteradas contribuem negativamente para atividades geológicas utilizando SR

O mapeamento litológico é uma importante tarefa em quase todos os levantamentos geológicos e a utilização do sensoriamento remoto para este fim é um complemento aos tradicionais trabalhos de campo. Da mesma forma, o levantamento estrutural a partir de sensoriamento remoto, visando orientar e/ou complementar atividades de campo, tem sido feito objetivando-se a caracterização de grandes zonas falhadas, áreas com intenso cisalhamento ou com variados padrões de fraturamento e dobramentos.

Por outro lado, a utilização do sensoriamento remoto na exploração mineral pode não ser uma atividade meramente complementar, mas sim representar um trabalho inicial de detecção de áreas promissoras. Como exemplo, pode-se citar a caracterização de zonas de alteração hidrotermal na busca de novos alvos prospectivos, principalmente para mineralizações metálicas. Com base nos resultados fornecidos pelo sensoriamento remoto, o geólogo pode definir metas de detalhamento de áreas promissoras (*"follow up"*), redirecionar objetivos ou mesmo descartar áreas.

Estas linhas têm sido exploradas com sucesso nas últimas décadas, utilizando sensores que captam a energia refletida dos diferentes materiais da superfície terrestre nas faixas do espectro eletromagnético relativas ao visível e ao infravermelho. A faixa do infravermelho termal é ainda pouco utilizada, apesar da grande potencialidade para mapeamento litológico e para caracterização de áreas de alteração hidrotermal. Isto advém do fato de que atualmente existem poucos sensores que operam na faixa termal, ou que não operam com adequada resolução espectral nesta faixa.

Dentro da linha de mapeamento de minerais de interesse exploratório, diversos são os estudos que descrevem o potencial de dados multiespectrais para caracterização de zonas ricas em óxidos e hidróxidos de ferro e argilo-minerais com a utilização do Landsat/5 TM e com o Geoscan MKII, conforme descrito por Crósta et al. (1996). Por outro lado, estudos desenvolvidos nos Estados Unidos com a utilização do sensor aeroportado TIMS (*Thermal Infrared Multi-Spectral Scanner*), construído pela NASA, têm mostrado que a faixa termal apresenta grande potencial para a discriminação de zonas ricas em sílica e/ou carbonatos (Kahle & Rowan, 1980; Sabine et al., 1994; Crowley & Hook, 1996). A utilização conjunta de dados destas três faixas espectrais representa, portanto, um avanço no sentido de se mapear os principais constituintes mineralógicos de zonas de alteração hidrotermal, que são óxidos de ferro, argilo-minerais, carbonatos e principalmente a sílica.

No Brasil, a avaliação de dados termais de sensoriamento remoto ainda não pode ser desenvolvida com plenitude. Isto advém do fato que os únicos dados termais de alta resolução existentes no país são do sensor aeroportado Geoscan MKII. Estes dados são de propriedade da empresa de mineração DOCEGEO (*Rio Doce Geologia e Mineração S/A*), não estando à disposição para uso geral. Por outro lado, apresentam grande quantidade de ruídos e interferências, observadas anteriormente por Lockett et al. (1993), Hernandes (1994), Crósta et al. (1996), Prado (1997) e Prado & Crósta (1997). Estes ruídos ocorrem principalmente nas bandas termais, tornando-se necessário a minimização dos mesmos para viabilizar a posterior utilização destes dados em aplicações geológicas e exploratórias.

O desenvolvimento desta dissertação visou abrir caminhos para utilização de dados termais em mapeamento geológico ou exploratório, bem como auxiliar o estudo e o processamento de outros dados termais, a serem adquiridos com futuros sensores que deverão operar nessa faixa do espectro eletromagnético.

Acrescenta-se também que são relativamente poucos os trabalhos desenvolvidos em regiões semi-áridas do Brasil com utilização do sensoriamento remoto. Em regiões semi-áridas a vegetação é de porte pequeno a médio e a superfície é composta por mantos de intemperismo com variadas espessuras, junto a várias exposições de rochas pouco intemperizadas.

Utilizou-se neste trabalho um conjunto de técnicas para o mapeamento de minerais de interesse exploratório a partir de imagens de sensoriamento remoto de alta resolução. Avaliou-se também o potencial dos dados multiespectrais do sensor Geoscan para pesquisa e exploração aurífera em zonas de alteração hidrotermal em regiões semi-áridas.

1.2. Objetivos

Neste trabalho procurou-se avaliar, além das bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, as bandas termais e seu potencial para caracterização litológica e para a geologia exploratória, através da identificação de assembléias de hidrotermalização. Neste sentido, os objetivos inicialmente propostos para esta pesquisa foram:

1. Estabelecer, com base nos trabalhos de Sabine (1996) e Spatz (1996), uma estratégia para utilização orientada dos dados Geoscan coletados sobre o Greenstone Belt do Rio Itapicuru (GBRI) à exploração e pesquisa aurífera. É previsto neste objetivo o desenvolvimento de uma metodologia com atividades seqüenciais onde deverão constar: a determinação do modelo de depósito que as mineralizações do GBRI se enquadram; a melhor aplicação para dados Geoscan; a escolha por técnicas apropriadas para pré-processamento e processamento digital de dados multiespectrais; as atividades de processamento digital dos dados e de avaliação em campo dos resultados eventualmente obtidos em imagens;
2. Estudar, avaliar e elaborar propostas metodológicas para minimização ou eliminação de ruídos em imagens de sensoriamento remoto por meio das Transformadas de Fourier (Gonzalez & Wintz, 1987), e com base em trabalhos de Rose (1989), Souza Fº et al., (1996, 1997) e outros. Este objetivo prevê o desenvolvimento de soluções

para a filtragem dos ruídos presentes nos dados termais do Geoscan e a filtragem sistematizada destas bandas e posterior utilização;

3. Aprimorar e difundir a utilização dos dados termais multiespectrais do Geoscan e também de outros sensores para atividades exploratórias. O conteúdo espectral dos dados termais Geoscan coletados sobre o GBRI deverão ser explorados de forma orientada à pesquisa e exploração mineral e para caracterizações geológicas;
4. Aplicar e avaliar técnicas existentes de processamento digital de dados de sensoriamento remoto coletados em variadas porções do espectro eletromagnético, objetivando a extração de informações geológicas em áreas semi-áridas. Este objetivo visa obter imagens com anomalias ou indicações que possam revelar áreas ou faixas com alteração hidrotermal, indicadores potenciais de mineralizações auríferas mesotermais Arqueanos e Proterozóicos que ocorrem em variados *greenstone belts* espalhados pelo planeta. Também é parte deste objetivo a determinação das melhores opções de processamento digital de dados multiespectrais para posterior aplicação sistemática em todos os dados coletados sobre o GBRI;
5. Determinar e caracterizar zonas ou faixas com alteração hidrotermal, possivelmente sulfetadas e/ou mineralizadas a ouro, que possam auxiliar novas pesquisas e atividades exploratórias de "*follow up*".

1.3. Justificativas

A área escolhida para este estudo foi o *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru, na porção norte do Estado da Bahia. A escolha por esta região se deve às seguintes particularidades observadas:

- A cobertura vegetal da região é de porte mediano com variações pouco extremas, sendo que em várias regiões vezes é ausente, o que propicia a exposição direta da superfície;

- O intemperismo das rochas geralmente é pouco expressivo, não ocasionando camadas muito espessas de solo. Algumas vezes são encontradas rochas frescas ou pouco alteradas em superfície o que, junto com a ausência de vegetação, contribui positivamente para aplicações geológicas de sensoriamento remoto;
- Existência de dados Geoscan coletados sobre todo este *greenstone belt*;
- A geologia regional e, em muitas porções, a geologia local, são bem conhecidas e detalhadas;
- E, principalmente, por se constituir numa área com diversas ocorrências auríferas mesotermais de interesse científico e econômico.

No tocante aos objetivos propostos para esta pesquisa, os principais argumentos os justificam são:

1. As mineralizações conhecidas no GBRI se encaixam como *mineralização em rochas e veios hidrotermalizados associados a zonas de cisalhamento* no modelo apresentado por Spatz (1996). Desta forma, a elaboração de uma metodologia específica para utilização dos dados Geoscan coletados sobre o GBRI pode permitir, no futuro, o mapeamento sistemático de zonas de alteração hidrotermal em todo este *greenstone,* uma vez que todo ele está imageado por este sensor. Segundo Spatz (*op. cit.*), de acordo com a resolução espacial e espectral dos dados Geoscan, os mesmos podem ser utilizados de forma orientada a atividade em escala regional até escala de depósito. Com isto, é possível o desenvolvimento de um mapeamento sistemático, com a definição de alvos prioritários e, posteriormente, o detalhamento dos alvos visando-se a caracterização e delimitação de depósitos possivelmente econômicos.
2. Verificou-se nos dados Geoscan do GBRI grande quantidade de ruídos (Lockett et al., 1993; Crósta et al., 1996; Prado, 1997; Prado & Crósta, 1997), que devem ser minimizados utilizando-se metodologias próprias para que a informação geológica contida nestas bandas possa ser aproveitada. O desafio a ser superado é a remoção da maior quantidade de ruídos, sem o prejuízo das informações contidas nas imagens. Foram adotados exemplos de outros pesquisadores como Rose (1989), Hummer-Miller

(1990), Souza Fº et al., (1996,1997), Souza Fº & Drury (1997) e outros que restauraram com êxito dados de diferentes sensores com as Transformadas de Fourier;

3. Estudos sobre a energia eletromagnética termal podem abrir caminhos para utilização dos dados termais Geoscan levantados sobre o GBRI e em outras regiões do Brasil, como também poderá auxiliar trabalhos com dados termais a serem adquiridos no futuro com novos sensores orbitais e/ou aeroportados (Sabine, 1996; Taranik & Crósta, 1996). Além disto, atividades dentro da linha de estudo do espectro termal são desenvolvidas nos Estados Unidos com a utilização do sensor aeroportado TIMS (JPL - NASA), que apresenta semelhanças ao Geoscan na distribuição das bandas. O TIMS foi desenvolvido para operar somente em TIR e a sua utilização tem gerado resultados satisfatórios nas atividades de mapeamento e discriminação litológica e também na caracterização de alteração hidrotermal (Kahle & Rowan, 1980; Kahle & Goetz, 1983; Sabine et al., 1994; Crowley & Hook, 1996);

4. A utilização de dados de sensoriamento remoto aplicados à exploração mineral através do mapeamento de minerais de alteração hidrotermal tem sido feita há algum tempo com resultados satisfatórios (Ashley & Abrams, 1980; Podwysocki et al., 1983; Elvidge & Lyon, 1984, Kaufmann, 1988; Moore & Liu, 1990; Loughlin, 1991; Crósta & Rabelo, 1993). Estudos semelhantes têm sido feitos no Brasil com utilização de dados do Geoscan e do Landsat TM (Hernandes, 1994; Crosta et al., 1996; Prado, 1997; Crósta & Prado, 1997), porém sem a utilização de dados termais. Deverão ser empregados dados termais junto aos dados coletados em VNIR e SWIR para melhorar a caracterização destas zonas hidrotermalizadas, adicionando-se melhoramentos às técnicas pré-existentes onde dados termais praticamente não foram utilizados;

5. A definição de faixas de alteração hidrotermal na região estudada pode contribuir significativamente para o conhecimento geológico local. Com isto seria possível promover-se o desenvolvimento de novas pesquisas científicas ou de atividades exploratórias direcionadas ao "*follow up*" com o objetivo de se estudar melhor os novos alvos, e se possível, caracterizar novos depósitos economicamente viáveis.

1.4. Área de Estudo

1.4.1. Localização

A área estudada está localizada no *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru (**GBRI**), que se encontra na região nordeste da Bahia (**Figura 1.1**), delimitada pelos paralelos 10°15' e 11°30' Sul e pelos meridianos 38°15' e 39°30' Oeste, perfazendo um total aproximado de 4.000 km^2; encontra-se a 300 km de Salvador e encontra-se próximas das principais cidades da região: Serrinha, Teofilândia e Araci.

A área escolhida encontra-se na porção sul deste greenstone, na região do distrito aurífero de Fazenda Brasileiro (**Figura 1.2**), na parte leste da Faixa Weber e a 10 km ao norte da cidade de Teofilândia, sendo ainda delimitada em seu extremo nordeste pela cidade de Araci. Esta porção do GBRI está inserida dentro das coordenadas UTM leste 499.000 e 502.600 e UTM norte 8.736.500 e 8.745.000, perfazendo um total aproximado de 50 km^2.

1.4.2. Vias de Acesso

Partindo-se de Salvador, o acesso a área de estudo é feita pela BR-324 até a cidade de Feira de Santana. Dai segue ao norte até Serrinha pela BR-116 e na mesma até as cidades de Teofilândia e Araci (**Figura 1.3**). O acesso local é feito pelas diversas estradas de chão que encontram-se ao lado esquerdo de quem segue para norte. Cortando de norte a sul na parte leste da área, encontra-se parte da antiga BR-116, que teve o traçado alterado cerca de 500 metros a leste. Nas proximidades da região passa uma linha ferroviária que vai de Juazeiro a Salvador e próximo a S^{ta} Luz existem algumas pistas de pouso para aviões pequenos.

1.4.3. Fisiografia, Clima e Vegetação

O terreno em geral apresenta-se com variação regulares de altitudes, não muito abruptas. As altitudes regionais variam de 150 a 500 metros e na área estudada mostram comumente variações entre 250 e 450 metros de altitude. Na maior parte o relevo se encontra medianamente erodido, não existindo grandes áreas de deposição detrito-aluvial, sendo estas mais freqüentes ao longo dos principais lineamentos estruturais de direção NS.

Ocorrem na região três elementos principais de drenagens: o rio Itapicuru e seus afluentes Rio do Peixe e Cariaça. O padrão das drenagens é dentrítico de baixa densidade. Geralmente, as drenagens de menor ordem encontram-se bastante entalhadas no terreno, associadas a fraturamentos. A maioria destas drenagens encontram-se perenes ou secas durante grande parte do ano e, em quase todas elas, são construídos açudes para armazenamento de águas. O clima característico é o semi-árido, com baixa umidade, altas temperaturas ao longo do ano e índice pluviométrico menor que 800 mm ao ano, sendo que as maiores precipitações concentram-se no verão.

Três tipos principais de vegetação ocorrem na região. A vegetação de caatinga típica de regime semi-árido é composta por arbustos, em geral semi-fechados, com alta variabilidade na estatura, entre 30 cm a até mais de 3 metros em espécies mais desenvolvidas. Característica desta vegetação é a alta taxa de degradação imposta por atividades antrópicas ao longo dos anos. Esta vegetação típica e nativa deu lugar a pastagens e culturas domésticas de sisal. As pastagens ocorrem como vegetação secundária, pós degradação da vegetação original. Esta vegetação encontra-se bastante aberta, com arbustos de pequeno porte, cactos e tipos gramíneos mais resistentes, variando entre alguns poucos centímetros a até no máximo cerca de 1,50 metros.

O sisal é um tipo vegetal de grande resistência a altas temperaturas e baixa umidade e suas folhas são largas, compridas, com um grande espinho em sua extremidade e permanecem verdes durante todo o ano. As fibras das folhas representam uma atividade econômica importante para a população da região. Em função disto existem na região grandes culturas de sisal. Isto faz com que ainda hoje, grande parte da vegetação nativa e de pastagens, seja transformada em plantações de sisal. Geralmente estas plantações encontram-se em áreas regulares recortadas por picadas mais largas, por onde é possível caminhar.

Nesta região, em função das culturas de sisal, ocorre, além do grande número de deficientes por acidentes com as máquinas de desfibramento do sisal, um dos maiores problemas sócio-econômicos do Brasil: a exploração de trabalho infantil na extração e desfibramento de sisal.

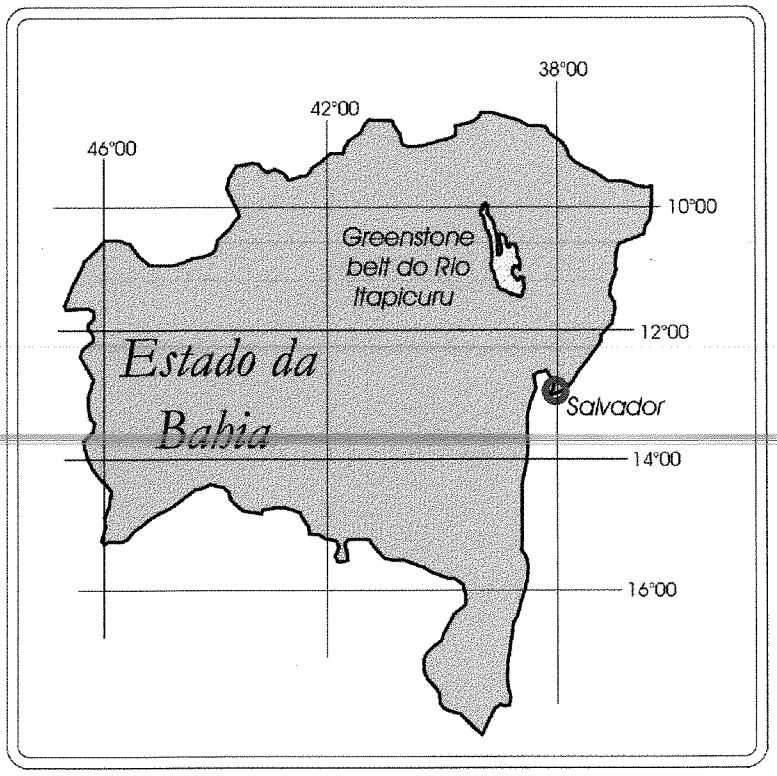


Figura 1.1: Localização do *greenstone belt* do Rio Itapicuru.

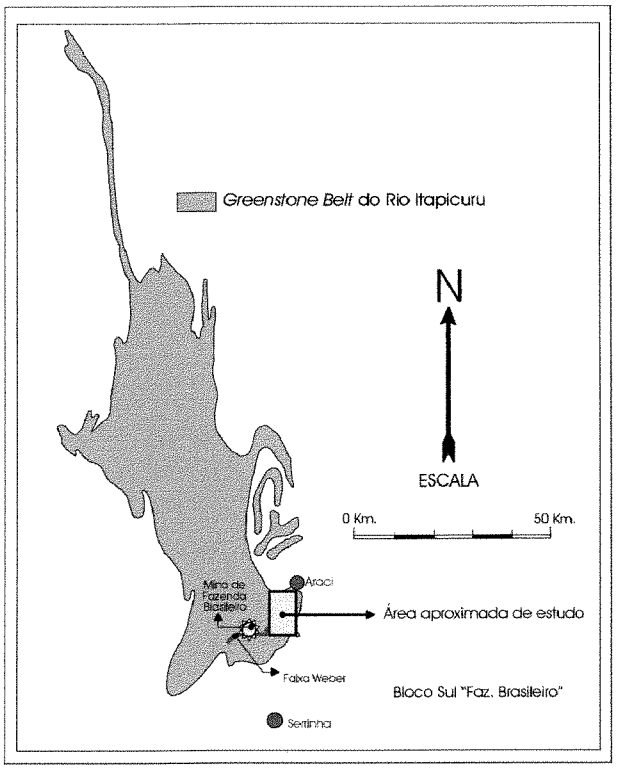


Figura 1.2: Esquema generalizado do GBRI com destaque para a Faixa Weber e para a área de estudo (retângulo) (mod. de Rocha Neto, 1994)

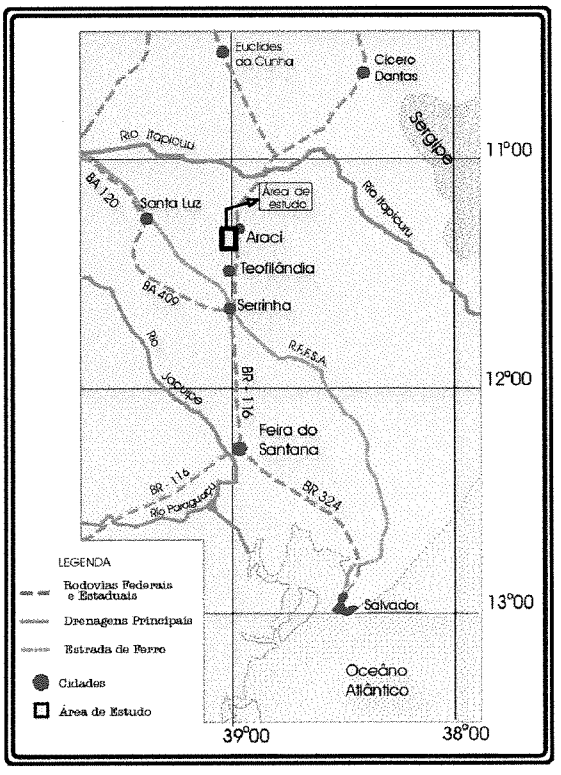


Figura 1.3: Mapa com as principais rodovias federais e estaduais de acesso à área de estudo (Modificado de Prado, 1997).

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GEOLÓGICOS DO GREENSTONE BELT DO RIO ITAPICURU

2.1 Geologia Regional

A área de estudo, próxima às cidades de Feira de Santana, Euclides da Cunha e Serrinha, encontra-se geologicamente posicionada na porção norte do Cráton do São Francisco. Esta porção do Cráton recebeu inicialmente a denominação de Complexo Metamórfico da Serrinha, que posteriormente foi mudada para *Greenstone Belt* da Serrinha, a partir do reconhecimento, por Mascarenhas (1973), de unidades vulcano-sedimentares e de texturas características. Atualmente este complexo conjunto de rochas é denominado *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru (GBRI) (Kishida & Riccio, 1980) (**Figura 2.1**).

O GBRI está inserido no Bloco de Serrinha, que representa um dos dois blocos estáveis do Cráton do São Francisco que, de acordo com Seixas *et al.* (1975 *apud* Rocha Neto, 1994), é uma entidade geotectônica que se manteve estável durante todo o Proterozóico Médio. Esta porção do cráton do São Francisco que contém o GBRI está localizada entre o conjunto de rochas granulíticas do Cinturão Móvel Salvador-Curaçá e o gráben que comporta as rochas sedimentares da Bacia de Tucano (Rocha Neto, 1994).

As principais litologias do Bloco de Serrinha, embasamento que suporta as unidades vulcano-sedimentares do GBRI, são no geral rochas gnáissicas e migmatíticas de idade Arqueana. Estas rochas pertencem ao Complexo Metamórfico-Migmatítico (Mascarenhas, 1973) que eqüivale aos grupos Pedra Vermelha, Uauá Superior (Inda *et al.*, 1976 *apud* Rocha Neto, *op. cit.*) e ao Complexo Pedra Vermelha (Lima *et al.*, 1981 *apud* Rocha Neto, *op. cit.*).

As rochas supracrustais vulcano-sedimentares do GBRI que se encontram sobre o embasamento são de idade Paleoproterozóica. Por outro lado, a Bacia de Tucano abrange rochas sedimentares de idade Mesozóica, tendo como principais litologias arenitos, siltitos, folhelhos, argilitos e calcários. Estes litotipos correspondem às Formações Aliança, Sergi, Candeias e São Sebastião (Rocha Neto, *op. cit.*). Sedimentos Neo-proterozóicos pertencentes aos grupos Canudos e Miabas recobrem partes do GBRI e do embasamento Arqueano.

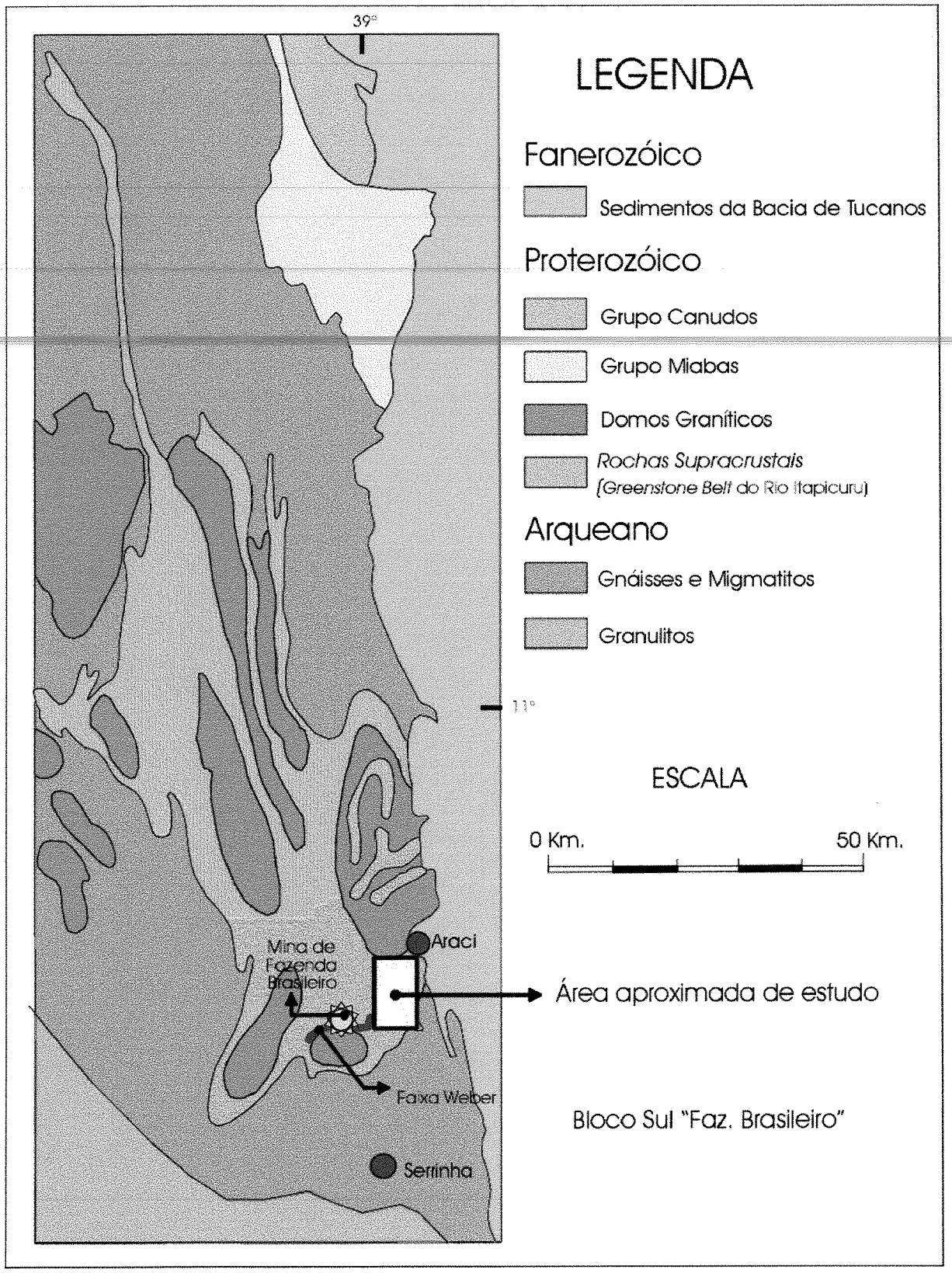


Figura 2.1: Geologia regional do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, Bahia. São destacadas a Faixa Weber, a mina de ouro de Fazenda Brasileiro e a área de estudo (retângulo amarelo), localizada a sudoeste da cidade de Araci (mod. Rocha Neto, 1994).

2.2. Contexto Geotectônico

Segundo Kishida (1979) e Figueiredo (1989), o GBRI se formou em um ambiente de bacia retro-arco de margem passiva, originada por encontro colisional de placas tectônicas e que teve seu ápice durante a Orogenia Transamazônica (Rocha Neto, 1994).

A proposta de um ambiente de bacia retro-arco foi inicialmente apresentada por Kishida (*op. cit.*), depois de apontar semelhanças entre basaltos encontrados no GBRI com toleiítos de fundos oceânicos modernos. Mais tarde Silva (1987, 1992) apresentou resultados geoquímicos destes basaltos que também apontaram para origem em assoalhos de fundos oceânicos.

Com base em outros estudos, verificou-se que a história da seqüência supracrustal deste *greenstone* começou em aproximadamente 2.200 Ma, quando ocorreram as primeira manifestações vulcânicas. Estas manifestações compreenderam inicialmente deposições de rochas máficas e ultramáficas, passando por manifestações mais intermediárias a ácidas e terminando com a deposição de sedimentos clásticos e químicos cratônicos (Rocha Neto, *op. cit.*).

De acordo com Chauvet et al. (1997a), em aproximadamente 2.127 Ma iniciou-se o fechamento da bacia Paleoproterozóica, que terminou em cerca de 2.020 Ma. Concomitante com o fechamento da bacia pelos esforços NW-SE, começaram a surgir as primeiras manifestações intrusivas de granitóides sin-tectônicos.

Durante o fechamento desta bacia, o regime compressional impôs um encurtamento horizontal à crosta. Ao atingir-se o limite máximo de encurtamento, surgiram como conseqüência as primeiras faixas de cisalhamento transcorrentes, modificando a dinâmica de fechamento deste *greenstone*.

Estas duas diferentes respostas ao fechamento ocasionaram a formação de dois diferentes padrões estruturais, cujo eventos deformacionais foram descritos por Davison *et al.* (1988), sendo por ele denominados de eventos D1 e D2.

Durante o fechamento da bacia ocorreram intrusões que, junto com o limite de encurtamento, colaboram com a mudança do regime deformacional D1 para D2, mesmo que sob um único regime tectônico compressional de direção NW-SE (Silva, 1992).

2.3. Litoestratigrafia

Kishida (1979) propôs a subdivisão do GBRI em três diferentes domínios litológicos, considerando as características genéticas dos diferentes grupos de rochas. Estas subdivisões, posteriormente revisadas por Silva (1984), ainda hoje permanecem. Os três diferentes conjuntos litogenéticos de Kishida (*op. cit.*) são:

a) A Unidade Basal, ou Domínio Vulcano Máfico (**DVM**);

b) A Unidade Intermediária, ou Domínio Vulcano Félsico (**DVF**);

c) A Unidade de Topo, ou Domínio Sedimentar (**DS**).

A Unidade Basal (DVM) compreende cerca de 60% das rochas do GBRI e encontra-se bem exposta na sua porção oeste. É formada principalmente por basaltos maciços, *pillow* lavas e brechas de fluxo intercalados freqüentemente entre sedimentos de origem química e filitos carbonosos (Silva, 1992). Também são reconhecidos nesta unidade derrames com estruturas porfiríticas, variolíticas e tufos máficos (Rocha Neto, 1994).

A Unidade Intermediária (DVF) é composta basicamente por lavas tufos vulcânicos e rochas piroclásticas e epiclásticas, todas com composição variando entre andesitos e riodacitos (Silva, *op. cit.*), em associação com rochas quartzo-dioríticas de natureza subvulcânica (Rocha Neto, *op. cit.*).

A Unidade Sedimentar (DS), no topo da seqüência, mostra uma mudança drástica na evolução do GBRI. É basicamente composta por rochas sedimentares clásticas com psamitos de granulação fina e pelitos (Chauvet et al., 1997b). Encontram-se nesta unidade arcósios e conglomerados, caracterizando proximidade de áreas fonte, em intercalação com cherts laminados, formações ferríferas bandadas e sedimentos ricos em manganês (Silva, 1992; Chauvet et al., 1997b).

O GBRI contém também rochas gnáissicas, migmatíticos e granulitos de idade Arqueana. Estas rochas compõem parte do embasamento crustal que abriga o conjunto supracrustal do GBRI (Figueiredo, 1989). Além das rochas supracrustais, ocorrem também neste conjunto, manifestações intrusivas diversas, representada por domos graníticos alongados, diques e sills.

Estas intrusões são *sin* a *pós*-tectônicas e podem ser divididas em dois diferentes grupos formados por:

- maciços graníticos e gnáissicos, em corpos alongados em forma elíptica (domos). Variam de composição tonalítica a granodiorítica e geralmente apresentam-se deformados nas bordas, com a geração de gnaisses graníticos e migmatitos, ambos cortados por pegmatitos turmalinítico (Matos & Davison, 1987). Também são anotadas intrusões graníticas porfiríticas sem deformação. Estas intrusões são consideradas por esses autores como *tardi* a *pós*-tectônicos;
- diques e sills compostos basicamente por dioritos e gabros intrudidos *tardi*-tectonicamente nas rochas supracrustais, principalmente em rochas do domínio sedimentar. Também são apontadas intrusões no domínio vulcano-félsico e nos gnaisses bandados do embasamento (Silva, 1992).

2.4. Arcabouço Estrutural Regional

As formas de relevo predominante no GBRI são condicionadas pelas estruturas dômicas e alongadas na direção NS, relativas aos granitos sin-tectônicos intrudidos e alongados durante o fechamento da bacia (Silva & Rocha Neto, 1993). Estes domos encontram-se ainda circundados por cinturões de rochas supracrustais metamorfisadas em fácies xisto verde a anfibolito (Silva, 1986).

Segundo Davison *et al.* (1988), o GBRI pode ser dividido em duas partes, de acordo com as principais feições estruturais encontradas que diferenciam a porção norte e central da porção sul. Com o aprofundamento de levantamentos estruturais foi verificado que estes dois padrões estruturais marcam duas fases distintas de deformação nomeadas D1 e D2 (Davison *et al.*, 1988; Reinhardt & Davison 1990).

Na porção norte e central Davison et al. (*op. cit.*) destacaram como principais estruturas a foliação de cisalhamento S1 com baixo ângulo, paralela ao acamamento S_0, com direção EW, e dobramentos de grande escala com vergência para leste e foliação plano-axial penetrativa NS com mergulho entre 50 e 70W. Estas duas estruturas foram relacionadas por Chauvet et al. (1997b) como originadas em regime compressivo e respectivamente à fase de

deformação F1 e F2 do evento D1, correspondentes ao predomínio deformacional horizontal e à colocação de corpos granitóides sin-tectônicos e deformações verticalizadas.

Além disto uma zona de cisalhamento com NS foi reconhecida por Davison et al. (1988) e Silva & Matos (1991) como sendo a principal estrutura na parte central do GBRI, e relacionada ao vento D2, sendo esta nomeada por Chauvet et al. (1997b) como *Main Shear Zone* (**MSZ**). A MSZ é o principal falhamento que contribuiu para o fechamento da bacia, apresenta foliação com direção geral NS, paralelas ao acamamento das unidades. Ocorrem ainda várias outras faixas associadas de cisalhamento menores, com mesma direção e geralmente com sentido sinistral.

Na porção sul são reconhecidos dobramentos isoclinais recumbentes, com vergência para norte e com foliação plano-axial penetrativa EW mergulhando cerca de 40° para sul. Reinhardt & Davison (*op. cit.*) e Silva & Matos, (*op. cit.*) reconhecem também nesta porção sul feições de cisalhamento extensional em rochas supracrustais, relativas ao evento D2, em regime rúptil-dúctil, sobrepondo totalmente feições de cavalgamento pré-existentes relativas a D1. Nesta porção do greenstone a principal estrutura que corresponde ao evento D2 é uma faixa de cisalhamento transcorrente com componentes de cavalgamentos, denominadas Faixa Weber. Esta faixa apresenta direção principal EW e estruturas tipo duplex de cisalhamento com vergência para o sul devido à intrusão do domo de Barrocas. Nesta faixa se encontram as principais mineralizações da região sul do GBRI (Silva & Matos, *op. cit.*).

Hoje em dia é aceito que as duas fases deformacionais D1 e D2 foram originadas a partir de um mesmo evento compressional de direção NW-SE, sendo que a partir disto Chauvet et al. (1997b) sugeriu que estes dois eventos de deformação representam estilos tectônicos verticais e horizontais correlacionáveis a diferentes modelos tectônicos que seguem em síntese os seguintes passos:

- o evento D1 seria o responsável por uma foliação plana tipo *thrusts* (cavalgamentos), com planos horizontalizados de cisalhamento e com lineações NW-SE e direção de cavalgamento SE;
- associado a D1 ocorrem as primeiras manifestações de plútons granodioríticos sin-tectônicos (e.g.: Domo de Barrocas); a intrusão destes granitóides, junto com uma tectônica de cavalgamento ocasionado por um encurtamento crustal

NW-SE, ocasionaram a formação de sinclinais e anticlinais alongados e conferindo ao *greenstone* um aspecto verticalizado;

- no momento que o fechamento da bacia atinge o limite máximo de encurtamento crustal ocorre a mudança de uma tectônica de cavalgamento predominantemente horizontal para uma tectônica transcorrente e predominantemente vertical; esta tectônica vertical, também chamada de evento D2, ocasionou o surgimento de um regime transcorrente sinistral (*strike-slip*) com direção NS e das principais faixas de cisalhamento com mesma direção.

2.5. Metamorfismo

Dentre os trabalhos que abordam o metamorfismo das rochas supracrustais do GBRI estão os de Silva (1992) e Silva & Rocha Neto (1993). Baseado em relações de campo, em estudos petrográficos e petrológicos, esses autores concluíram que ocorreram três fases distintas de metamorfismo nas rochas supracrustais do GBRI:

1) evento M1, estático, de fundo oceânico, responsável pela hidratação das lavas máficas e félsicas;
2) evento M2, de natureza dinamotermal, concomitante à colocação dos corpos granitóides sintectônicos do evento deformacional D1 (Silva & Matos, 1991). Este evento foi responsável pela desidratação da pilha vulcano-sedimentar e geração de paragêneses metamórficas das fácies xisto-verde e anfibolito;
3) evento M3, de natureza exclusivamente termal, restrito aos arredores dos corpos granitóides intrusivos.

Segundo observações de Silva (1983, 1987), parece claro que o evento M2 foi o mais importante a nível regional, gerando inclusive um zoneamento metamórfico nesta porção do greenstone, passando de fácies xisto-verde no centro para anfibolito nas partes periféricas do cinturão de supracrustais (Silva & Rocha Neto, 1993).

O evento M1 é marcado pela presença de minerais como clorita, calcita, albita, quartzo e pirita, passando para a assembléia mineral actinolita, epidoto, albita, clorita, calcita, quartzo e pirita e ocorre predominantemente na parte central do *greenstone*.

A transição da fácies xisto verde para anfibolito é marcada pela presença abundante de fluídos ricos em H2O, CO2, e S, que provavelmente foram liberados pela pilha vulcano-sedimentar. Em resposta a processos dinamotermais, estes fluidos migraram para áreas de menor pressão e temperatura, representadas por falhamentos gerados nos estágios iniciais do evento deformacional D2.

Os fluidos foram os responsáveis pelas transformações químicas do sistema fluído-rocha e pela geração dos principais halos de alteração hidrotermal que ocorrem ao longo das faixas cisalhadas, sendo que estas alterações hidrotermais são caracterizada por carbonatação, cloritização, silicificação e sericitização (Silva & Rocha Neto, *op. cit.*).

2.6. Geocronologia

Os primeiros trabalhos sobre o GBRI colocaram-no como de idade Paleoproterozóica. Foi determinada, para as unidades gnáissicas do embasamento cratônico, a idade de 2.9 Ga, calculada pelo método U-Pb em zircões, denotando origem Arqueana para os mesmos (Silva, 1993). Idade semelhante foi obtida por Silva (1997) em zircões de xenólitos migmatíticos encontrados dentro do Domo de Ambrósio, sendo interpretado como um resto de crosta continental que existiu anteriormente à formação do GBRI.

Por outro lado, Brito Neves *et al.* (1980) determinaram a idade entre 2,0 e 1,8 Ga para o fechamento da bacia Proterozóica do Rio Itapicuru, classificando este evento como de idade Transamazônica. Neste mesmo trabalho foi determinada para alguns plútons graníticos a idade de 1,8 Ga, ou seja, do fim do Ciclo Transamazônico, e seriam portanto de colocação pós-tectônica.

Silva (*op. cit.*) apresentou os seguintes resultados de determinação de idades para rochas representantes das diferentes unidades do GBRI:

- 2,209 Ga para os basaltos toleiíticos da unidade metavulcânica máfica pelo método rocha total (Pb-Pb) e 2,2 Ga com a análise isotópica Sm-Nd;

- 2,1 Ga para as rochas andesíticas da unidade metavulcânica félsica a intermediária com o método rocha total (Pb-Pb) e 2,12 Ga com a análise isotópica Sm-Nd;
- 2,0 Ga para grauvacas da unidade metassedimentar determinada com a análise isotópica Sm-Nd.

Para rochas provenientes dos plútons graníticos de Barrocas e Nordestina, Chauvet et al. (1997a) determinaram pelo método rocha total (Pb-Pb) idades de 2.127 ± 5 Ma e 2.100 ± 10 Ma respectivamente, considerando-as como idades de cristalização das rochas. Para o plúton Barrocas foi determinada a idade de 2.000 ± 21 Ma através do método Ar/Ar (Chauvet *et al.*, 1997a). Este domo foi correlacionado por Silva *et al.* (1994) como contemporâneo ao evento D1, contrastando com a formação do Domo de Nordestina. Segundo Silva (1987), o Domo de Ambrósio apresentou idades diferente de 2,1 Ga como havia sido proposto por Gaal *et al.* (1987, *apud* Silva 1987).

2.7. Mineralizações Auríferas

Foi observada a ocorrência de ouro em zonas brechadas com enriquecimento em sílica na forma de veios, sendo o ouro concentrado principalmente nas bordas (Teixeira, 1985). Este autor também observou que, apesar destes veios apresentarem predomínio em sílica, muitas vezes continham também pedaços de rochas encaixantes.

O ouro é encontrado no GBRI em associação com veios à base de quartzo, albita e sulfetos (Kishida *et al.*, 1991). De forma ampla, o ouro é associado às rochas supracrustais afetadas por cisalhamento de caráter rúptil-dúctil e natureza transpressiva (Kishida *et al.*, op. cit.).

Os dois grandes exemplos são os distrito auríferos de Maria Preta e Fazenda Brasileiro. Em Maria Preta, o ouro é encontrado em metassedimentos carbonáceos, metariodacitos silicificados, metadioritos e veios quartzo-carbonosos (Xavier, 1991), enquanto que em Fazenda Brasileiro associa-se aos xistos magnéticos (magnetita-quartzo-clorita xisto), particularmente em veios e vênulas de quartzo com sulfetos, carbonatos e albita com zonas de alteração hidrotermal (Teixeira, op. cit.).

Em alguns lugares, o ouro pode ser encontrado próximo ao topo do lençol freático, em formas de "placas" com até 1 centímetro de espessura, resultado de alterações supergênicas de áreas com alto teor em ouro. Enquanto isto, abaixo do topo do lençol freático, o ouro ocorre disseminado com granulação fina (Teixeira, op. cit.).

O ouro encontra-se também disseminado em veios de quartzo gerados em zonas de cisalhamentos da fase F1 do evento D1 (Silva & Matos, 1991), em rochas com paragênese da fácies xisto-verde, com evidências de terem interagido com fluídos ricos em CO2, K e As dentre outros (Silva & Rocha Neto, 1993). Porém, as melhores concentrações são associadas ao evento deformacional D2 ou durante a tectônica vertical onde ocorrem a instalação e o desenvolvimento das grandes zonas de cisalhamento e estruturas associadas (Davison *et al.* 1988; Silva & Matos,1991; Chauvet et al. 1997b).

Silva & Coelho (1993) sugerem que as mineralizações ocorrem principalmente ao longo ou nas proximidades de contatos litológicos entre unidades com forte contraste de competência, alojando-se principalmente em fraturas de cisalhamento o tipo C e P e secundariamente em fraturas R, R′, P′, S, C′, e T, e em sistemas de veios em fraturas de dilatação paralelas aos planos axiais de dobras tardias.

É sugerido por Silva & Rocha Neto (*1993*) que as mineralizações auríferas com melhores teores econômicos encontram-se associadas a colocações sintectônicas de granitóides nas zonas de cisalhamento. Observaram ainda o enriquecimento em Au em faixas de cisalhamento em rochas ricas em óxidos e/ou silicatos de ferro que provavelmente são originadas a partir de rochas máficas.

Desta forma Silva & Rocha Neto (*op. cit.*) determinaram dois fatores que condicionaram a concentração do ouro no GBRI: (1) a presença de forte excitação térmica, capaz de promover a circulação de fluídos; (2) a natureza das rochas encaixantes.

Por outro lado, os fluídos mineralizantes nos depósitos Maria Preta e Fazenda Brasileiro são semelhantes em composição, com baixa salinidade e com presença significativa de CO2 e, subordinadamente, CH4 e N2 (Xavier, 1991).

Xavier (1993) conclui que a composição dos fluídos mineralizantes do GBRI é semelhante a vários outros depósitos auríferos mesotermais que ocorrem em granito-*greenstone* espalhados em diferentes áreas cratônicas do planeta, e que os fluídos responsáveis pelo transporte e deposição do ouro derivaram-se do metamorfismo regional, a partir de

reações de desidratação e decarbonatação, que ocorrem na transição entre fácies xisto-verde e anfibolitos em temperaturas entre 540 e 500 °C.

2.8. Contexto Geológico Local

A área estudada já tem sido pesquisada há algum tempo por técnicos da DOCEGEO e, como resultado das atividades de levantamento geológico, foi gerado um mapa em escala 1:40.000, usado nesta dissertação como base geográfica-geológica. Esta base foi compilada (**Figura 2.2**) e utilizada para guiar as atividades de campo e os estudos geológicos locais. Uma vez que quase não existem referências detalhadas e publicadas da região de estudo, as observações não constantes no mapa base que são aqui comentadas foram obtidas durante o trabalho de campo.

Esta região apresenta como principal estrutura geológica uma grande dobra sinclinal, com eixo aproximado a EW, formada por rochas supracrustais, limitadas ao norte por rochas gnáissicas quartzo feldspática do embasamento cristalino, e ao sul pelo Granito Teofilândia e pela unidade de composição dacítica chamada Quartzo-Pórfiro. Este Quartzo-Pórfiro, por sua vez, pode representar uma litologia parente do Granito Teofilândia adjacente, uma vez que apresentam características composicionais muito semelhantes bem como a presença de grãos de quartzo azulados.

As outras feições estruturais observadas na região, além do grande sinclinal, são zonas com intenso cisalhamento com direções principais variando próximo de E-W, localizadas nas proximidades dos contatos entre unidades máficas e rochas adjacentes (gnaisses ao norte e Quartzo Pórfiro ao sul). Ainda nestas zonas de contato são observados vários falhamentos verticalizados de direção aproximada N60° a N70°, onde se encontram as principais drenagens da área. Nestas faixas ocorrem inúmeras fraturas de caráter rúptil-dúctil associadas aos falhamentos.

As rochas nestas faixas de cisalhamento encontram-se muitas vezes milonitizadas, com minerais como quartzo e feldspatos estirados e alongados. O preenchimento de veios associados a estes falhamentos é geralmente por quartzo, clorita e sericita, além de grande quantidade de hidróxidos de ferro amorfos em capas lateríticas e, algumas vezes, carbonatos.

São ainda observadas falhas mais recentes, de caráter rúptil, com direção aproximada N150°, marcando grandes e contínuas fraturas que perfazem em alguns casos mais de 4 km. Em algumas destas fraturas observa-se deslocamentos sinistrais localizados e de pequenos deslocamentos. Associados a estes planos encontram-se veios de quartzo leitoso, esbranquiçado e com pouca presença de minerais de ferro, com exceção dos locais onde este grupo de fraturas intercepta falhamentos de outras direções.

A principais textura encontrada nas rochas da região é xistosa passando a gnaisses e milonitos. Geralmente são xistos ricos em quartzo, clorita, sericita e minerais férricos (hematita, goetita, limonita e outros). Alguns destes xistos mais ricos em ferro foram denominados de "xistos magnéticos" em Fazenda Brasileiro (Teixeira, 1989) e são correspondentes às rochas gabróicas e basálticas que sofreram deformações intensas e enriquecimento hidrotermal. Os gnaisses ocorrem preferencialmente ao norte da área em rochas quartzo-feldspáticas do embasamento. Ao sul também ocorrem quartzo gnaisses e quartzo xistos (Quartzo Pórfiro), originados como produto de deformação das rochas dacíticas da unidade Quartzo-Pórfiro. Também ocorrem metaconglomerados vulcanoclásticos proto-milonitizados e metassedimentos clásticos e químicos indivisos.

No domínio das rochas gabróicas na faixa norte da área ocorrem intercalações com rochas mais ricas em quartzo, clorita, epidoto, minerais de ferro e sericita, perfazendo até algumas poucas centenas de metros de comprimento por algumas dezenas de metros de espessura, que na maioria das vezes encontram-se paralelas aos contatos litológicos regionais. Esta transição pode ser bem acompanhada em campo, uma vez que há um forte contraste de cor no solo correspondente, passando de ocre marrom de solos de origem mais gabróica para ocre claro tendendo ao rosa quando em solos provenientes destes corpos intercalados ricos em quartzo.

Este fenômeno não foi tão claramente observado nas rochas gabróicas da faixa sul, onde, segundo o mapa base, também ocorrem e são anotadas como intercalações de metagabros e metadacitos (Quartzo Pórfiro). Estas rochas da faixa na parte sul da área estudada são interpretadas, segundo o mapa base, como uma continuidade das rochas que compõem a Faixa Weber, a sudoeste da área estudada, onde se encontra o distrito de Fazenda Brasileiro.

2.9. Discussão

Durante todo este capítulo foram abordadas as principais características geológicas do GBRI. A partir de uma síntese das principais características associadas à presença do ouro em rochas do *greenstone*, é possível tecer uma "expectativa geológica" associada à área de pesquisa.

De forma ampla, as principais mineralizações são associadas ao evento de deformação D2 , que é principalmente caracterizado por zonas de cisalhamento transcorrentes, e também a rochas metagábricas enriquecidas hidrotermalmente. Foi anteriormente observado que regiões de contato entre litologias de forte contraste, associadas às falhas e fraturamentos, com evidências de enriquecimento dos em minerais hidrotermais, são os sítios mais propícios a portar mineralizações auríferas significativas. A paragênese mineral que pode evidenciar a alteração hidrotermal de rochas é composta principalmente por sílica, clorita, sericita, goetita, magnetita, hematita e, em menor proporção o epidoto, carbonatos e caolinita.

Desta forma, foi possível se criar uma "expectativa" a respeito da área estudada com uma reunião de características que provavelmente poderiam ser encontradas, uma vez que as observações acima citadas a respeito das mineralizações do GBRI são observadas também na área de estudo, e em clara associação.

Na área são observadas duas principais faixas de cisalhamento intenso apresentando direções próximas a N70E, que cortam a litologia de metagabros próximo aos contatos litológicos com rochas mais ácidas (gnaisses Qz-Fk e metadacitos do Qz-Pórfiro). Este forte contraste pode ter propiciado a deposição de ouro.Nestas faixas também são observadas mudanças mineralógicas para paragêneses minerais características de alteração hidrotermal, com claro enriquecimento em sílica, clorita e sericita, bem como em minerais opacos que podem ser sulfetos, óxidos ou hidróxidos de ferro. Evidências claras do enriquecimento nestes minerais podem contribuir para a localização de prováveis sítios portadores de mineralizações auríferas.

A faixa de metagabros ao sul, possível continuidade da Faixa Weber, deve, a partir da extrapolação das principais características encontradas em Fazenda Brasileiro, apresentar fortes evidências de alteração hidrotermal e possivelmente portar mineralizações auríferas. Na atividade de campo algumas destas evidências foram confirmadas, o que fez com que esta faixa fosse merecedora de especial atenção durante a pesquisa.

Figura 2.2: Mapa geológico local (mod. Docegeo).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

As imagens multiespectrais do sensor aeroportado Geoscan constituíram a principal fonte de dados para este estudo. Estes dados foram processados através de programas específicos para o processamento digital de dados multiespectrais.

3.1.1. O Sensor Geoscan

O sensor aeroportado Geoscan AMSS MKII (*Airborne Multispectral Scanner System*), de propriedade da empresa Geoscan Pty. Ltd., foi desenvolvido principalmente para fins de exploração mineral. Primeiramente foi desenvolvido o modelo MKI, em 1984, com 13 bandas. Com base neste, foi desenvolvido a seguir o modelo MKII, com 24 bandas (Lyon & Honey, 1990; Lockett et al., 1993). As 24 bandas do sensor MKII estão distribuídas entre as faixas VNIR, SWIR e TIR e possibilitam a detecção de informações relativas a diversos minerais, incluindo óxidos e hidróxidos de ferro, filossilicatos, sílica e carbonatos (Agar, 1994). O modelo MKII dispõe de 46 opções de bandas, das quais 24 podem ser selecionadas simultaneamente. Este sensor encontra-se alojado em um avião modelo Cessna 404 (Prado, 1997).

Segundo Agar (*op. cit.*), o Geoscan (MKI e MKII) possui boa razão sinal/ruído (SNR) possibilitando o uso de seus dados sem pré-processamento. Cada DN registra três diferentes componentes: a energia medida, efeitos atmosféricos e adição eletrônica de ruídos e interferências. O imageador MKII tem um campo de visada instantânea de 3.0 miliradianos e campo de visada de ±45° (visada total de 90°). A resolução espacial varia de 3 a 20 metros por pixel no nadir dependendo da altura de vôo, podendo recobrir entre 3 e 20 Km de largura em cada faixa imageada.

Cada ponto levantado é quantificado em pixels com 8 bits de resolução radiométrica, perfazendo um total de 256 valores para cada DN. Uma característica inerente a este sensor é o fato de que, primeiramente, é feito um sobrevôo para verificação da "luminosidade" média da área, quando então os detectores são calibrados para um DN = 127 e um ajuste do ganho e "offset" é aplicado. Em seguida são feitos os vôos para coleta de dados registrando-se ganhos e perdas em relação a este valor de DN. Este procedimento eqüivale de certa forma à uma correção aproximada dos efeitos atmosféricos, fazendo com que essas imagens possam ser utilizadas para comparação com curvas espectrais de materiais de referência. Por outro lado, isto torna difícil a transformação das imagens do Geoscan para valores de reflectância aparente (Agar, *op. cit.*; Prado & Crósta, 1997).

Dentre as distorções encontradas nas imagens deste sensor estão a distorção *tan-theta*, o tamanho do pixel e a curva sigmóide. Outras relativas aos movimentos do avião são ocasionadas pelo vento, elevação do terreno e por instabilidade nos três eixos do avião, ocasionando as distorções de *roll*, *pitch* e *yaw*. As três primeiras distorções são corrigidas logo após ao levantamento, enquanto que as três últimas, relativas à instabilidade da aeronave são corrigidas em fase de pré-processamento através de correção geométrica (Hernandes, 1994).

As distorções ocasionadas por diferença altimétrica são posteriormente corrigidas com auxílio de dados de um altímetro radar acoplado na aeronave. As distorções ocasionadas pelo vento podem ser corrigidas com a determinação do ângulo entre a direção do vento e a direção pretendida (Prado, 1997).

Este é um sensor do tipo *across-track*, que utiliza um espelho giratório para distribuir a energia que chega ao sensor para os 24 detectores. Cada linha imageada coleta dados em 768 pixels, reamostrados para 1024 para corrigir as distorções em áreas correspondentes às diferenças em dimensões dos pixels centrais e laterais da faixa de vôo. Este rearranjo é feito automaticamente após a coleta dos dados, corrigindo a distorção *tan-theta* (Agar, *op. cit.*; Prado, *op. cit.*).

3.1.1.1. O Aerolevantamento Multiespectral Sobre o GBRI

As principais informações do aerolevantamento do *greenstone belt* do Rio Itapicuru foram extraídas de Lockett et al. (1993) e de Prado (1997). As principais características deste aerolevantamento são:

- Área aproximada de cobertura de 3.150 km^2;
- Cobertura com 12 linhas de vôo na direção norte-sul;
- Altura de vôo de 7.800 pés (2559 metros) em nadir;
- Resolução espacial de 5x5 metros;
- Largura da faixa imageada de cerca de 4,9 km;
- Recobrimento lateral das faixas imageada em cerca de 10%;
- Presença marcante de ruídos nas bandas termais e, em menor intensidade, nas bandas do SWIR de algumas das faixas imageadas.

Neste aerolevantamento as configurações utilizadas para as bandas do Geoscan são apresentadas na **Tabela 3.1**, que mostra o posicionamento central e a largura de banda para todas as 24 bandas espectrais.

Número das Bandas	Intervalo Espectral	Posição Central (*micrometro*)	Largura da Banda (*micrometro*)
1	VNIR	0,522	0,042
2		0,583	0,067
3		0,645	0,071
4		0,693	0,024
5		0,717	0,024
6		0,740	0,023
7		0,830	0,022
8		0,873	0,022
9		0,915	0,021
10		0,955	0,020
11	SWIR	2,044	0,044
12		2,088	0,044
13		2,136	0,044
14		2,176	0,044
15		2,220	0,044
16		2,264	0,044
17		2,308	0,044
18		2,352	0,044
19	TIR	8,640	0,530
20		9,170	0,530
21		9,700	0,530
22		10,220	0,533
23		10,750	0,533
24		11,280	0,533

Tabela 3.1: Configuração das 24 bandas Geoscan do aerolevantamentos do GBRI (Lockett et al., 1993).

3.1.2. Processamento de Dados

Para avaliação dos dados do Geoscan foi necessária a utilização de programas apropriados para o processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Foram

utilizados os programas ER Mapper (ERM, 1995) e ENVI (RSI, 1997) e estações de trabalho SUN do Laboratório de Processamento de Informações Georreferenciadas (LAPIG), do Instituto de Geociências da UNICAMP.

Atividades de digitalização e vetorização foram desenvolvidas respectivamente com o AutoCAD (R13 e R14) e o CorelDraw 7.0, em sistema operacional Windows95 e WindowsNT (Microsoft) em microcomputadores do tipo IBM PC do Laboratório de Editoração gráfica (LEG) e do LAPIG, ambos do IG-UNICAMP.

3.1.3. Outros Materiais

Outros materiais utilizados encontram-se abaixo listados:

- GPS marca Garmin, modelo 45XLII;
- Mapa e Perfil Geológico 1:40.000 fornecido pela DOCEGEO;
- Lâminas delgadas para estudos petrográficos;
- Microscópio da marca Carl-Zeiss, modelo U-TRIM, para o estudo de lâminas delgadas;
- Microscópio da marca Zeiss-West Germany, modelo Axiophot, para documentação fotográfica de lâminas delgadas;
- Câmera fotográfica Nikon.

3.2. Métodos

Os métodos e técnicas abordados nesta pesquisa foram agrupados segundo os diferentes temas abordados:

1. Um método organizacional para o desenvolvimento prático da pesquisa, com seqüências de atividades separadas em etapas para o melhor gerenciamento do tempo dispendido;
2. Uma metodologia para emprego do SR no auxílio à exploração aurífera no GBRI. Esta metodologia, aborda o tema geológico envolvido nesta pesquisa e prevê o uso

de dados de alta resolução espectral objetivando orientar atividades exploratórias de detalhamento, partindo de estudo em escala regional através do processamento das imagens para escala de depósito com cheques de campo e amostragens.

3. Avaliação de técnicas para filtragem de ruídos periódicos em imagens de sensoriamento remoto, mais especificamente para os dados termais do Geoscan.
4. Avaliação de técnicas de processamento digital de imagens multiespectrais selecionadas para atividades de reconhecimento de variados tipos de minerais e delineação de contrastes litológicos.

3.2.1. Estrutura de Desenvolvimento da Pesquisa

O projeto de pesquisa foi desenvolvido em seis diferentes etapas. Estas etapas estão o apresentadas esquematicamente no fluxograma da **Figura 3.1:**

1) **Pesquisa bibliográfica**. antecedeu as atividades preliminares, tendo sido também desenvolvida concomitantemente ao desenvolvimento da pesquisa;
2) **Filtragem de ruídos das imagens**. como os dados do Geoscan apresentam ruídos, principalmente na porção termal, tornou-se necessário um pré-processamento específico para a minimização destes. Adotou-se como diretriz a utilização de operadores do tipo Fourier;
3) **Processamento dos dados multiespectrais**. esta atividade visou a identificação de áreas com ocorrência de minerais típicos de alteração hidrotermal e também a discriminação litológica entre as diferentes unidades geológicas que ocorrem na área. A partir dos resultados obtidos desenvolveu-se a interpretação e definiram-se alvos e objetivos para posterior verificação de campo, enfocando as áreas anômalas obtidas com as diferentes técnicas. Esta etapa visou também avaliar diferentes técnicas que podem aplicadas aos dados do Geoscan e a qualidade dos resultados obtidos;
4) **Atividade de campo para verificação de anomalias**. a atividade de campo se fez necessária para a verificação das anomalia obtidas com o processamento digital de imagens da etapa anterior. Foram feitas coletas de amostras de algumas das regiões anotadas como de ocorrências de alteração hidrotermal e outras em granitos-gnaisses com e sem ocorrência de anomalias para comparação;

5) **Análise das amostras coletadas e avaliação dos resultados**. as amostras coletadas foram analisadas por duas diferentes formas. Foi feita uma avaliação petrográfica para verificar-se efeitos hidrotermais ou não em escala microscópica e também foi feita análise química para Au por Absorção Atômica em amostras coletada aleatoriamente na superfície das áreas identificada como anômalas nas imagens. Os resultados das análises auxiliaram a interpretação dos resultados obtidos em imagens. Fez-se então uma avaliação conjunta dos diversos dados adquiridos durante as etapas anteriores de pesquisa para a elaboração de conclusões que podem auxiliar futuras atividades de pesquisa dentro de um projeto de exploração mineral com emprego do SR.

6) **Elaboração da dissertação**.

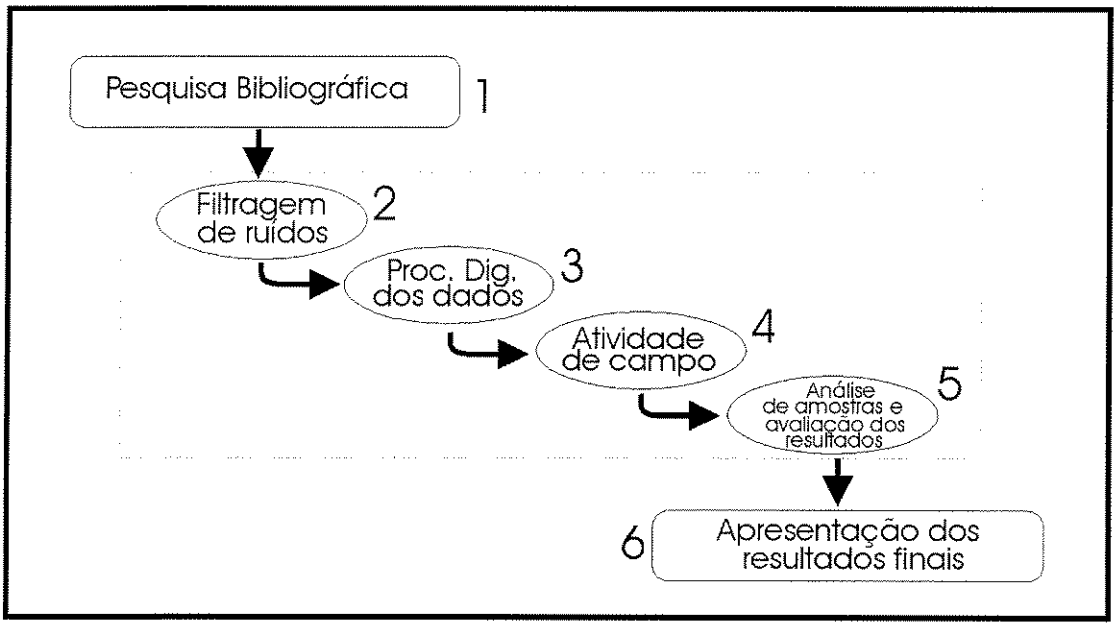


Figura 3.1: Esquema geral da organização de atividades da pesquisa com seis etapas seqüenciais. Dentro do retângulo maior pontilhado encontram-se as etapas mais importantes em termos de pesquisa.

3.2.2. Estratégias Para Pesquisa Aurífera no GBRI

Para utilização dos dados Geoscan na identificação de áreas promissoras à exploração aurífera no GBRI foi elaborada uma metodologia para orientar as atividades de pesquisa deste projeto. Esta metodologia tomou por base algumas das proposições de Sabine (1996) e Spatz (1996), que definem estratégias de emprego do sensoriamento remoto no auxílio às atividades de exploração mineral.

Sabine (*op. cit.*) aborda a importância do processamento de imagens digitais de sensoriamento remoto em estágios iniciais de atividades exploratórias, visando orientar os trabalhos de pesquisas para alvos obtidos com o processamento. Por sua vez, Spatz (*op. cit.*) elaborou uma estratégia de exploração mineral, onde primeiramente se define um modelo de depósito para o bem mineral procurado, define-se depois a escala do trabalho a ser desenvolvido e, com estas informações em mãos, define-se um sensor a ser empregado a partir da resolução espacial e espectral que melhor se encaixe aos seus modelos.

O principal modelo das mineralizações que ocorrem no GBRI são depósitos em sistemas de veios associado a zonas de cisalhamento, intrusões graníticas e hidrotermalização de veios e rochas. As principais litologias onde se encontram grande parte das mineralizações são xistos carbonosos e xistos magnéticos, originados por metamorfismo de rochas vulcânicas básicas e metagabros intrusivos. Esta rochas apresentam evidências de hidrotermalização, com enriquecimento em sílica, sericita, clorita, hematita e goetita, entre outros. Genericamente, as mineralizações do GBRI seguem o modelo apresentado na **Figura 3.2**.

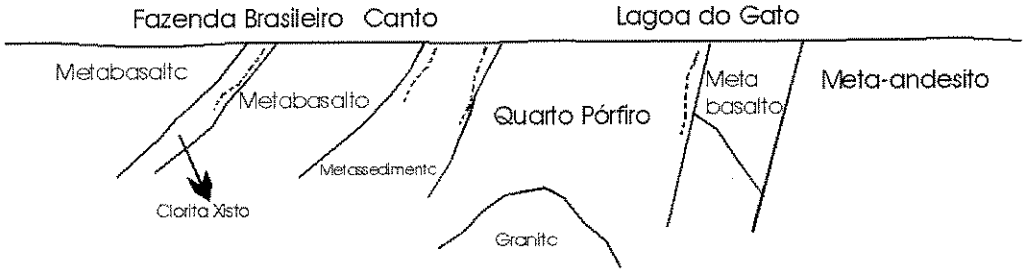


Figura 3.2: Perfil geológico regional esquemático SW-NE da região de pesquisa. Detalhe para Fazenda Brasileiro para o alvo Lagoa do Gato e para o povoado do Canto, todos rebatidos no perfil. Linhas pontilhadas são faixas com cisalhamento com presença de sistemas de veios mineralizados e atividade hidrotermal (Mod. de DOCEGEO).

Com a definição do modelo de mineralização que ocorre no GBRI e com base na **Tabela 3.2** (proposta por Spatz, 1996), pode-se selecionar as características dos produtos de sensoriamento remoto que melhor se adequam à atividade exploratória. Esta tabela apresenta as principais características geológicas envolvidas e a escala apropriada de atividade levando-se em conta a resolução espacial e espectral do sensor escolhido.

Considerando que o sensor multiespectral Geoscan apresenta resolução espacial de 5 metros e que opera conjuntamente nas faixas VNIR, SWIR e TIR, verificou-se que as melhores aplicações para estes dados seriam na escala de depósito, podendo ser também usados em escala de reconhecimento regional.

A partir destas informações foi elaborada uma seqüência metodológica de atividades, apresentada esquematicamente na **Figura 3.3**. Os objetivos são: (1) caracterizar regiões com ocorrência de minerais indicadores de alteração hidrotermal, através do processamento digital de imagens e; (2) tomando como base os resultados obtidos anteriormente e avaliados, definir alvos para posteriormente serem visitados e/ou explorados em atividades de campo.

Características	Descrição	Intervalo Espectral (micrometros)	Escala e Resolução Espacial (metros)
Alteração Primária	veios de quartzo, sericita (albita) clorita, carbonato	2.15-2.35	Depósito 4-6 m
Alteração Secundária	hematita, goethita	0.6-0.8 e 0.8-1.0	Depósito 4-6 m
Rochas Hospedeiras	metavulcânicas, metassedimentos, greenstones, formações ferríferas	VNIR TIR SWIR	Depósito 10-20 m
Zoneamento	quartzo ou carbonatos, clorita, sericita (albita)	SWIR TIR	Depósito 4-6 m e Reconhecimento 5-20 m
Estruturas	Falhas normais de alto ângulo,eixos de dobras e bacias	SWIR VNIR TIR	Depósito 4-8 m
Vegetação	Decresce diretamente sobre mineralizações	NIR	Depósito 4-6 m

Tabela 3.2: Modelo para definição das anomalias características dos produtos de sensoriamento remoto, adequados à exploração de depósitos auríferos em sistemas de veios e exalações hidrotermais (Mod. de Spatz, 1996).

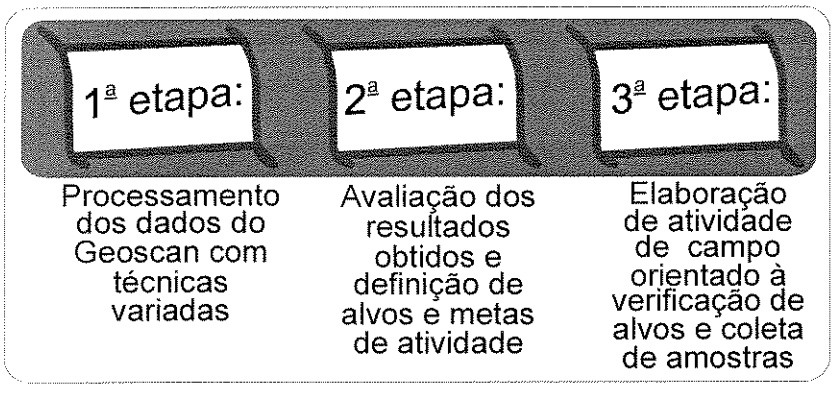


Figura 3.3: Atividades orientadas à utilização dos dados Geoscan para a exploração aurífera na área de estudo.

A seqüência metodológica adotada é separada em três diferentes etapas, cujos resultados são apresentados detalhadamente no Capítulo 5 desta dissertação:

- **Etapa 1**. Aplicação e utilização de técnicas buscando a caracterização geológica e a identificação de faixas e regiões menores, em escala de depósito, onde ocorram minerais indicadores de alteração hidrotermal.
- **Etapa 2**. Depois do processamento, os resultados obtidos foram confrontados entre si e com o mapa geológico atualizado da região em escala 1:40.000. Com

esta avaliação foram reconhecidas unidades geológicas definidas para este *greenstone belt* e determinou-se as áreas com anomalias espectrais relacionadas a minerais de alteração hidrotermal.

- **Etapa 3**. A partir dos resultados da avaliação e determinação de alvos, esta terceira etapa consistiu em checar em campo as unidades discriminadas nas imagens e também nos alvos onde foram anotadas anomalias dos minerais pesquisados. Buscando embasar estes resultados, foram coletadas algumas amostras para avaliação petrográfica, buscando-se evidências de alteração hidrotermal e de enriquecimento dos minerais pesquisados.

3.2.3 Pré-processamento

A principal atividade de pré-processamento dos dados Geoscan consistiu na filtragem de ruídos periódicos principalmente nas bandas termais. Estes ruídos, anteriormente comprometem o uso de grande quantidade de dados levantados para o GBRI (Lockett et al., 1993; Crósta et al., 1996; Prado, 1997).

A partir desta necessidade, verificou-se que a literatura sobre filtragem de ruídos periódicos em imagens digitais é bastante extensa e variada. Muito embora a presença de ruídos periódicos tenha sido verificada em quase todos os tipos de imagens de sensoriamento remoto multiespectral (e.g., AVIRIS, TIMS, JERS-l, SPOT, AVHRR e GEOSCAN), ainda são poucos os trabalhos que tratam única e exclusivamente a filtragem da ruídos em imagens de sensoriamento remoto.

Dentre os diversos trabalhos consultados e que apresentaram bons resultados encontram-se os de Rose, (1989), Hummer-Miller, (1989), Westin (1990), Simpson & Yhann (1994), Full & Eppler (1993), Souza Fº et al. (l996; 1997) e Souza Fº & Drury, (1997). A maioria destes trabalhos envolve a filtragem de ruídos no domínio de freqüências com a utilização de Transformadas de Fourier (Gonzalez & Wintz, 1987).

A imagem digital coletada pelo sensor representa um conjunto de dados em domínio espacial (**Figura 3.4.a**). Após a transformação destes dados através de uma Transformada de Fourier, os mesmos passam do domínio espacial para um domínio de freqüências (**Figura 3.4.b**), onde toda informação digital passa a ser representada de acordo com suas freqüências em todas as direções dentro do domínio espacial.

A vantagem de se analisar uma imagem no domínio Fourier é que, com esta operação, é possível separar-se totalmente feições de baixa, média e alta freqüências (**Figura 3.5**). O mesmo não pode ser realizado de modo tão eficiente no domínio espacial. Isto possibilita a remoção de valores referentes a determinados intervalos de freqüência com a adoção de filtros ou máscaras.

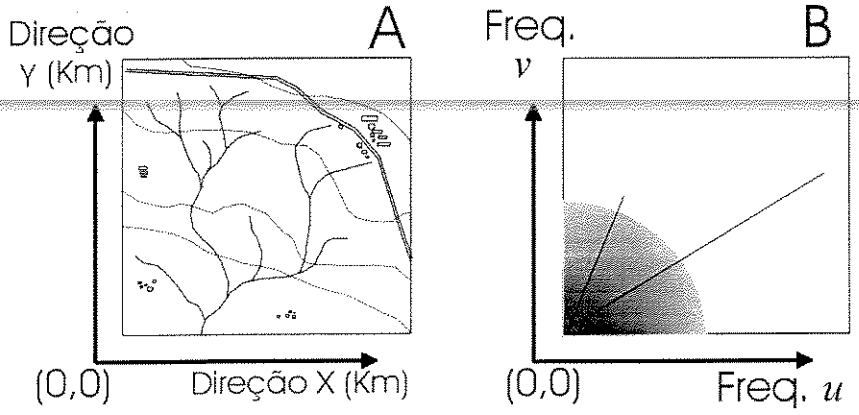


Figura 3.4: **(A)** representação de uma área geográfica em domínio espacial; e **(B)** representação esquemática da mesma área no domínio de freqüência.

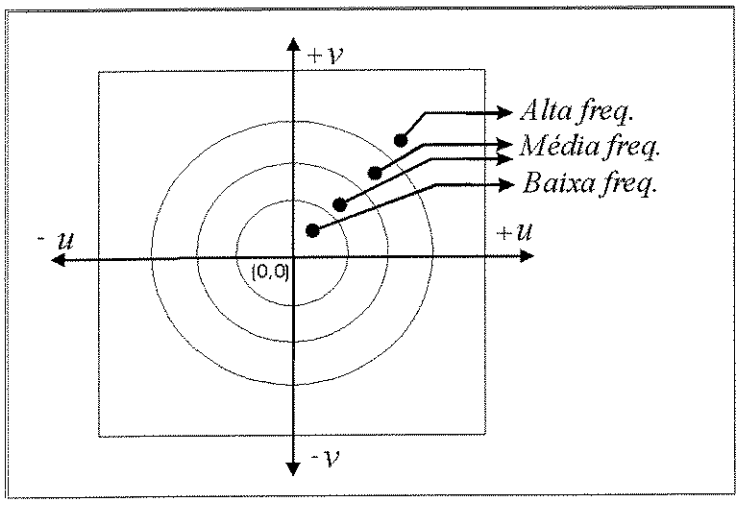


Figura 3.5: Distribuição das freqüências baixas, médias e altas em um espectro Fourier. O centro do espectro apresenta freqüência (0,0). As freqüências aumentam em módulo nas duas direções, à medida em que se afastam do centro do espectro.

A metodologia para utilização das Transformadas de Fourier e filtragem de ruídos em domínio de freqüência, apresentada por Gonzalez & Wintz (*op. cit.*) e detalhe por Souza Fº et al. (1996) foi esquematizada por Penteado et al. (1997) em 4 diferentes etapas apresentadas na **Figura 3.6** abaixo:

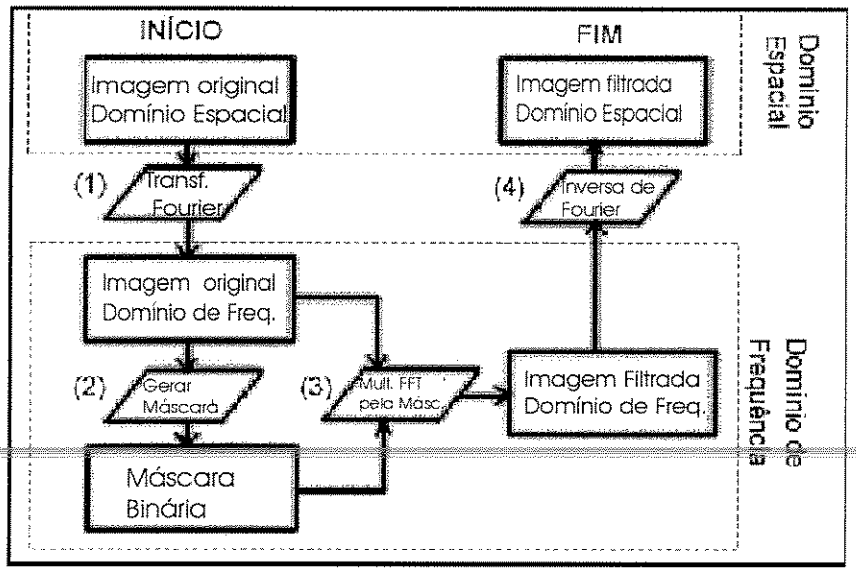


Figura 3.6: Etapas de filtragem de ruídos com o uso das Transformadas de Fourier

Em uma breve síntese, estas etapas referem-se à:

1. transformação da imagem original com ruído, do domínio espacial para o domínio de freqüências, através da Transformada Rápida de Fourier *(Fast Fourier Transform ou* FFT*)*;
2. análise do espectro Fourier, a partir do qual são individualizados intervalos de freqüência correspondentes aos ruídos e geradas as máscaras necessárias para a filtragem das freqüências desejadas;
3. multiplicação da máscara gerada pelo espectro Fourier original para a eliminação ou suavização dos intervalos de freqüências escolhidos;
4. transformação da FFT filtradas, do domínio de freqüência, novamente para o domínio espacial, através da Transformada Inversa de Fourier *(Inverse Fourier Transform ou IFT)*.

Esta metodologia prevê transformações dos dados originais em outros intermediários até se chegar ao resultado final, sem ruídos. Nesta figura os retângulos representam os diferentes dados processados, enquanto que os lozângulos representam as técnicas de processamento aplicadas. Nas etapas 2 e 3 podem ser implementados pelo usuário filtros e máscaras elaborados com ferramentas computacionais.

Nestes sentido, a metodologia apresentada foi empregada nesta pesquisa e novos tipos de máscaras e filtros foram desenvolvidos, exclusivamente para filtragem dos dados Geoscan.

O desenvolvimento de filtros e máscaras, bem como as atividades desenvolvidas e os resultados obtidos, são apresentadas no **Capitulo 4**.

3.2.4. Técnicas Usadas Para o Processamento Digital de Dados Geoscan

3.2.4.1. Atividades Preliminares

As primeiras atividades desenvolvidas com os dados multiespectrais do sensor Geoscan abrangem a aplicações de técnicas básicas. Dentre estas encontram-se: o realce de contraste com espalhamento balanceado através da técnica BCET (Liu, 1991); composições coloridas RGB com bandas puras; composições coloridas RGB a partir da diferença entre duas bandas (Lockett et al., 1993; Agar, 1994; Prado, 1997); e elaboração de principais componentes (Gonzalez & Wintz, 1987).

Após a aplicação destas técnicas, outras duas foram utilizadas com o propósito de se obter caracterizações mais precisas de anomalias próprias de alteração hidrotermal. Estas outras técnicas aplicadas são: FPCS e o Realce por Decorrelação (Decorrelation Stretch).

3.2.4.2. Seleção de Principais Componentes por Feições Espectrais (FPCS)

Esta técnica foi originalmente desenvolvida para o processamento de dados do Landsat TM na identificação de anomalias de óxidos e hidróxidos de ferro, filossilicatos e carbonatos (Crósta & Moore, 1989; Loughlin, 1991; Crósta & Rabêlo, 1993).

Posteriormente Crósta et. al. (1996), Prado (1997) e Prado & Crósta (1997) mostraram os resultados da adaptação da técnica FPCS para os dados multiespectrais Geoscan. Devido à maior resolução espectral do Geoscan em relação ao Landsat TM, esta adaptação permite a identificação de um número maior de minerais que não eram detectados pelo sensor TM do Landsat. Basicamente esta técnica consiste em três etapas:

(1) escolha do mineral a ser pesquisado e a avaliação da curva espectral deste mineral quanto ao posicionamento das bandas mais apropriadas do sensor utilizado; seleção de quatro diferentes bandas para cada mineral pesquisado;

(2) avaliação das quatro bandas escolhidas na etapa anterior através da análise por principais componentes. Nesta avaliação identifica-se a PC que corresponde a Componentes Minerais (**CM**) do mineral pesquisado;

(3) representação conjunta das CMs para diferentes minerais avaliados em composições coloridas tipo RGB, ocasionando imagens coloridas com destaque para as regiões anômalas nos minerais pesquisados.

A escolha de quatro diferentes bandas para um determinado mineral é feita selecionando-se duas bandas onde ocorrem pontos mínimos de absorção em sua curva espectral (ou baixa emissão em TIR) e outras duas com pontos máximos de reflexão (ou alta emissão em TIR).

A identificação da CM para o mineral pesquisado é feita pela análise dos parâmetros estatísticos (matriz de auto-vetores) das quatro bandas selecionadas. A matriz de autovetores é convertida para valores percentuais e examinada para contraste entre duas diferentes bandas que representam respectivamente pontos de baixa e alta absorção (e/ou emissão) e que apresentam sinais opostos. Esta PC é então chamada de Componente Mineral do mineral pesquisado.

A representação colorida RGB é feita com a adoção de três diferentes CMs, para cada uma das componentes da composição RGB. Um recurso proposto por Loughlin (1991) para aumentar o número de representações de CMs em composições RGB é através da utilização da Principal Componente n°1 entre duas diferentes CMs.

Esta principal componente corresponde aos dados correlatos entre estas duas CM (e.g.: PC1 entre CM da sílica e CM da sericita = ocorrência conjunta de sílica+sericita). Nestas composições geralmente os pontos que apresentam alta correlação entre as três componentes utilizadas aparecem na cor branca.

3.2.4.3. O Realce por Decorrelação

Dados multiespectrais e hiperespectrais de sensoriamento remoto apresentam geralmente alta correlação interbandas devido ao pequeno *bandpass* dos detectores e pontos centrais de localização das bandas muito próximos entre si.

Esta alta correlação interbandas, observada principalmente em bandas termais, dificulta a utilização dos mesmos como subsídio ao mapeamento litológico (Kahle & Rowan, 1980).

Consequentemente, composições coloridas RGB elaboradas a partir dessas bandas mostram-se quase desprovidas de cores, pois a distribuição da nuvem de pixels no espaço RGB ocorre preferencialmente ao longo do eixo acromático (Soha & Schwartz, 1978).

Para remover essa correlação e ocupar o espaço cromático de forma otimizada, utiliza-se a técnica de "realce por decorrelação" (*decorrelation stretch)*. Esta técnica tem sido aplicada com sucesso aos dados TIMS por vários autores (Kahle & Goetz, 1983; Gillespie *et al.*, 1984, 1986).

O princípio básico desta técnica consiste em:

(a) avaliar a correlação entre as bandas com a elaboração das principais componentes;
(b) inverter os eixos (linhas e colunas) da matriz de autovalores com uma função de transposição (matriz transposta);
(c) aumentar o contraste dos grupos de pixels com funções linear, gaussiana e outras;
(d) multiplicar a matriz inversa pela função de transposição, para retornar ao sistema de eixo iniciais.

Após estes procedimentos, as bandas selecionadas passam a não ter mais correlação espectral. Para melhorar a visualização dos resultados desta técnica utiliza-se três diferentes bandas em composições coloridas RGB.

O resultado será uma imagem com maior número de cores dentro do espectro RGB, com destaque maior para pixels que antes apresentavam alta correlação e por isto eram desprovidos de cores. Pelo fato de que esta técnica está baseada na análise por Principais Componentes, é possível realçar a decorrelação entre várias bandas simultaneamente.

CAPÍTULO 4

A FILTRAGEM DE RUÍDOS EM IMAGENS GEOSCAN

4.1. Caracterização do Ruído

A presença de ruídos em dados de algumas bandas do sensor Geoscan, coletados sobre o GBRI, tem sido destacada por diversos autores. Entretanto, a forma de ocorrência, natureza e o impacto destes artefatos ainda não foram avaliados. No sentido de detalhar este problema do ruído nas imagens Geoscan, foi selecionada uma imagem específica de dimensões 1.100 linhas por 1.000 colunas, que compreende um padrão complexo de ruídos. Este padrão é representativo da maior parte dos artefatos constatados nas imagens Geoscan geradas no levantamento do GBRI.

A análise foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa foi feita a caracterização dos ruídos no domínio espacial, procedendo-se na segunda etapa a investigação dos mesmos no domínio de freqüências, através das Transformadas de Fourier.

4.1.1 Domínio Espacial

Algumas das bandas do Geoscan referentes às porções SWIR e TIR do espectro eletromagnético, nas faixas adquiridas sobre o GRBI, apresentam vários tipos de ruídos. A presença de ruídos, em ordem decrescente de intensidade, se dá nas bandas 24, 23, 21, 22, 20, 19, 18, 16 e 17. Isto evidencia um aumento do ruído proporcional ao comprimento de onda, com uma maior ocorrência nas bandas termais. Nas três últimas bandas do SWIR (18, 16 e 17), o sinal não é tão comprometido pela presença de artefatos e, por este motivo, estas bandas não foram avaliadas neste estudo, o qual se concentrou nas bandas com maior intensidade de ruído. A banda 24, por sua vez, apresenta-se quase que completamente dominada por ruídos, independentemente das características da superfície imageada no aerolevantamento.

Os ruídos nas imagens Geoscan podem ser agrupados segundo aspectos 'geométricos' particulares (**Figuras 4.1.a – 4.1.f**). Nestas figuras nota-se que os padrões geométricos de ruídos, resultantes da interferências entre diferentes tipos de ruído com variadas amplitudes e frequência, ocasionam feições bastante peculiares.

O padrão mais comumente observado são conjuntos de listas não muito retilíneas, que não ocasionam interferências. Estes ruídos lineares, que ocorrem nas seis bandas TIR, apresentam padrões estruturados e periódicos muito semelhantes entre si, com pequenas diferenças na amplitude e na frequência original.

Em uma análise visual destaca-se a semelhança entre os padrões de ruídos observados nas seis bandas termais. A Análise por Principais Componentes (**APC**) pode ser utilizada para caracterizar a correlação do ruído entre as bandas e para destacar o padrão mais comum de ruído presente.

Os resultados da APC das seis bandas termais revela que que estes ruídos possuem média a alta correlação. Dessa forma, foi possível perceber que a maior parte dos ruídos periódicos concentra-se nas PCs de número 2 e 3 (**Figuras 4.2.a** e **4.2.b)**, indicando haver uma boa correlação interbanda entre esses ruídos. Nestas figuras é possível observar as feições geométricas resultantes da interferência de ruídos periódicos que diferem em freqüência e amplitude. A correlação média a alta da estrutura e da intensidade com que os ruídos ocorrem denota uma origem comum para os mesmos, independente da banda.

4.1.2. Domínio de Frequências

As imagens analisadas acima no domínio espacial foram convertidas para o domínio de freqüências com a aplicação de *Transformadas de Fourier.* Esta transformação permite uma separação precisa entre as frequências da imagem que definem o sinal espectral nelas contido dos ruídos presentes (**Figura 4.3.a)**. Para melhorar o aspecto visual do espectro Fourier foi adotado um operador escalar logarítmico, que realça a distribuição dos valores do espectro. Este reescalonamento possibilita uma análise mais precisa da distribuição dos valores (intensidade) ao longo das duas direções de freqüência dentro do espectro **(Figura 4.3.b)**.

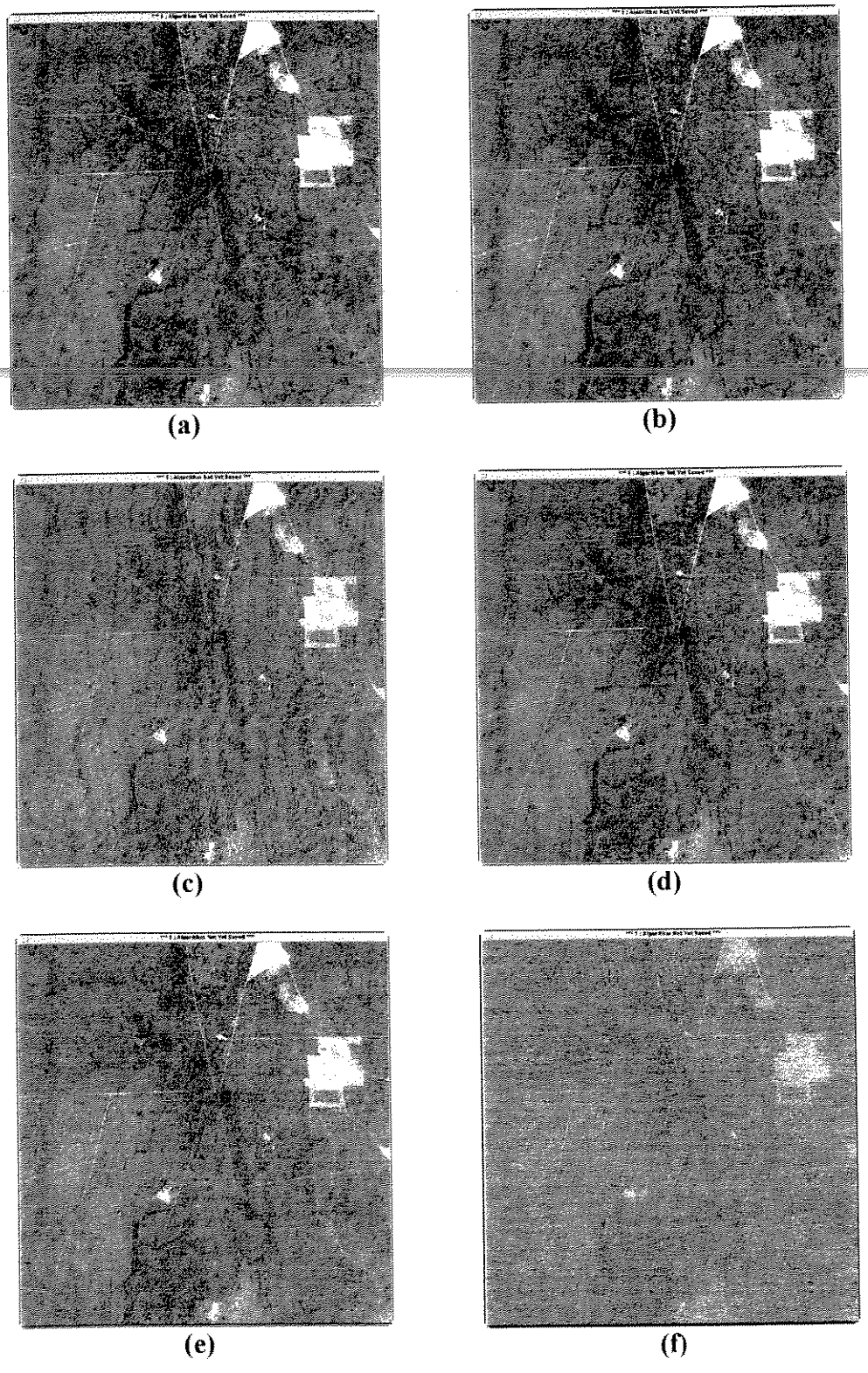


Figura 4.1: Bandas Geoscan 19 a 24 originais contendo ruído.

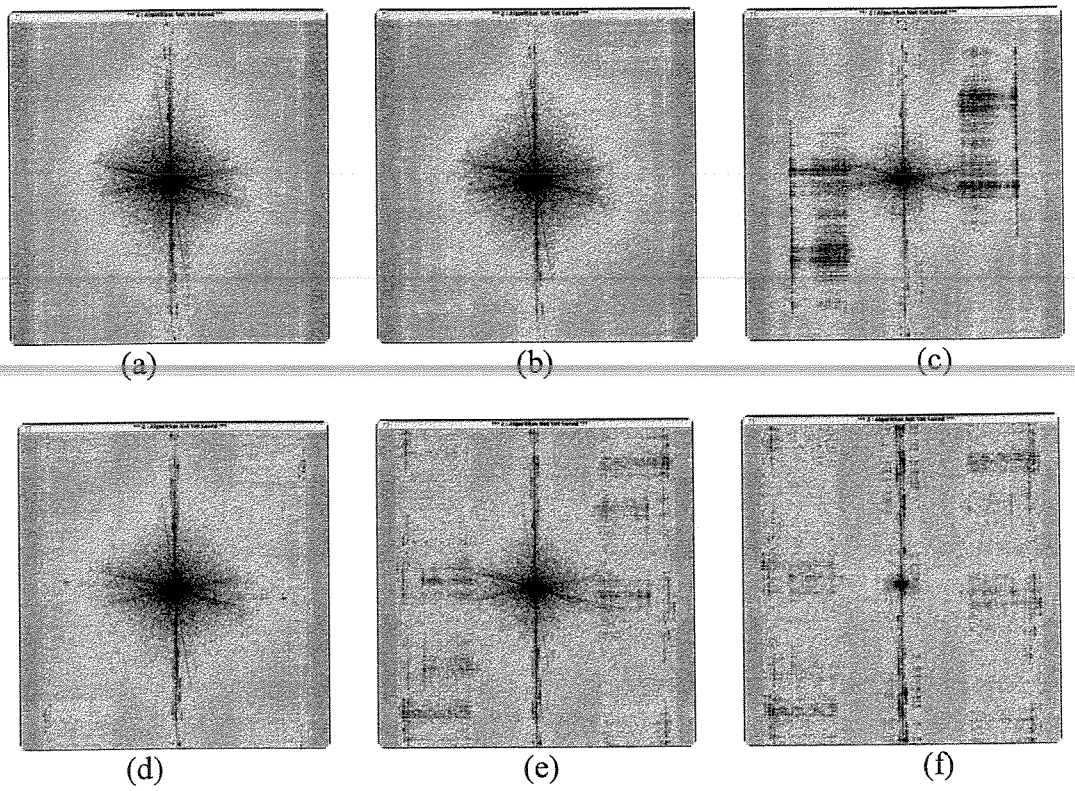
Porém, o reescalonamento logarítmico provoca também uma redistribuição dos valores do espectro original, modificando a distribuição dos mesmos ao longo do histograma da imagem. Como pode ser observado na **Figura 4.4**, esta redistribuição de valores causa um deslocamento do histograma da imagem, originalmente centrado próximo ao zero (0) com aspecto simétrico, para porções negativas e com uma leve assimetria à esquerda. As figuras **4.4.a** e **4.4.b** ilustram a diferença entre o histograma original e o histograma dos valores do espectro Fourier da banda 21 reescalonados logaritmicamente.

Estas bandas termais foram convertidas para imagens em domínio de freqüência e reescalonadas logaritmicamente para melhor avaliação das feições diagnósticas. Os espectros Fourier após o reescalonamento podem ser visualizadas na **Figura 4.6**.

A avaliação visual permitiu verificar que os espectros Fourier das seis bandas apresentam feições de ruídos com estruturas semelhantes entre si (tal como inferido através do estudo realizado no domínio espacial). O ruído presente nestas imagens pode ser, quanto ao aspecto visual, desmembrado em três principais componentes (**Figura 4.6**): uma faixa central e outras duas simetricamente espaçadas situadas nos lados (em linhas azuis). Observa-se nas faixas laterais que ocorrem agrupamentos de pixels com maior ou menor intensidade (marrom), relativos a ruídos mais complexos com freqüências maiores que o sinal central.

Ainda nesta figura é possível observar a concentração central de pixels, que representam as informações espectrais (círculo verde) as quais, via de regra, são de baixa a média freqüência. Destacam-se também a partir do centro, além da faixa vertical principal, dois alinhamentos indicando a presença de um tipo característico de ruído periódico, com direções definidas (perpendicular aos alinhamentos no domínio espacial), mas com variação contínua de freqüência. As interferências entre este dois ruídos centrais podem explicar as principais feições geométricas observadas nas imagens no domínio espacial (**Figura 4.1**).

Na região central (que caracteriza as frequências baixas a médias) os ruídos descritos encontram-se superpostos ao sinal, o que torna difícil a tarefa de remoção destes sem o comprometimento da informação espectral original. Como pode ser observado na **Figura 4.5**, estes alinhamentos com mesma direção ocorrem no espectro das seis bandas, evidenciando mais uma vez a correlação interbandas do ruído.



Figuras 4.5: Espectro Fourier das bandas 19 a 24, respectivamente.

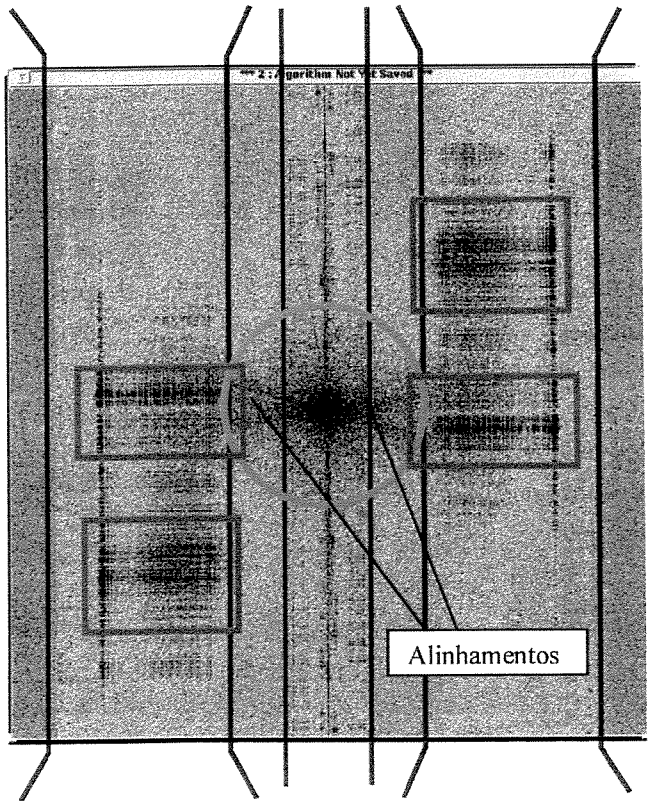


Figura 4.6: Espectro Fourier da banda 21. Nota-se as três faixas de ruídos (delineadas em azul). Dentro destas faixas, as regiões distribuição mais elevada de freqüências relativas a ruídos encontram-se marcadas por retângulos marrom. A porção central do espectro agrupa as componentes de baixa e média frequência do sinal (círculo verde).

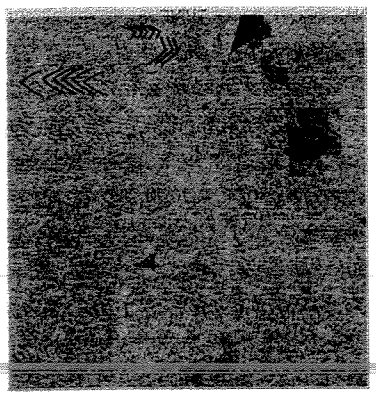
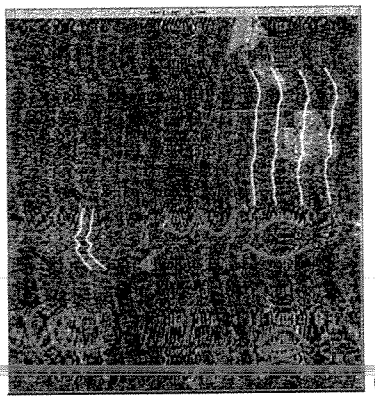

(a)

(b)

Figura 4.2: **(a)** PC n° 2 com ruídos retilíneos com direções alternadas (vermelho). **(b)** PC n° 3 com feições geométricas de interferências entre tipos diferentes de ruído.

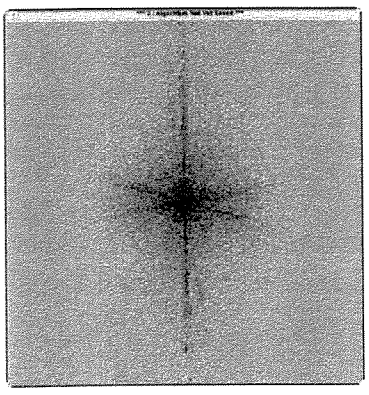
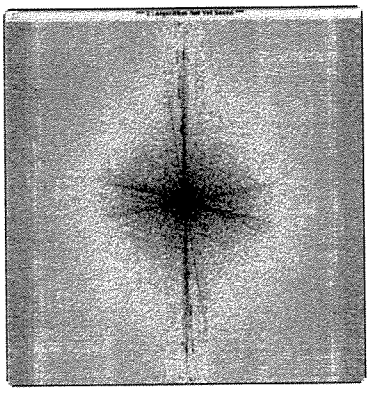
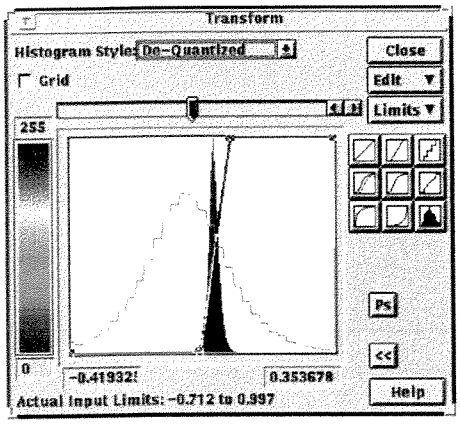
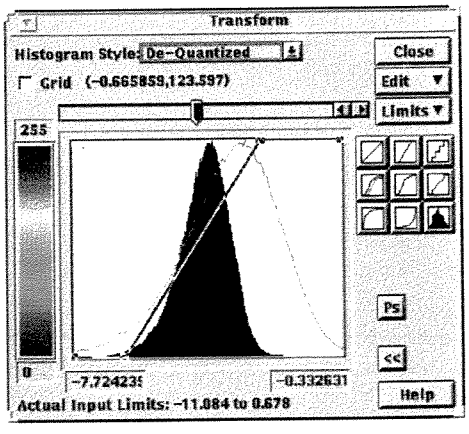

(a)

(b)

Figura 4.3: **(a)** Espectro Fourier da Banda 19. **(b)** Espectro após o reescalonamento logarítmico. Note o realce de feições não observadas na figura **(a)**.



(a)


(b)

Figura 4.4: Histograma do espectro Fourier da banda 21. **(a)** Aqui os valores variam de –0.7 até 0.9. Com corte de 0.5% nas extremidade os limites passam para –0.4 e 0.35 (distribuição equilibrada em torno do valor zero); **(b)** Após reescalonamento valores com limites entre –11.0 e 0.6 e, com corte de 0.5%, entre –7.7 e –0.3. Observe neste caso que os valores do histograma ocupam intervalo negativo.

4.1.3. Discussão das Análises

A estrutura dos ruídos observadas no espectro Fourier das seis bandas é bastante semelhante, muito embora os ruídos possam variar significativamente em amplitude de uma banda para outra. Esta alta 'correlação estrutural' corrobora de forma mais precisa os aspectos definidos sobre estes ruídos no domínio espacial, ou seja, estes são similares em todas as imagens, variando somente em intensidade.

A partir disto, a constatação mais evidente é que há um notório prejuízo na qualidade das imagens observadas no domínio espacial, à medida em que a distribuição e a intensidade dos *clusters* aumenta no espectro Fourier correspondente. Isto pode ser constatado, por exemplo, no espectro da banda 24, onde se observa que a porção central, que compreende as frequências baixas a médias, é muita restrita e a imagem é dominada por ruídos. Da mesma forma, isto é também observado na imagem da banda original, onde se nota muito pouca informação espectral e uma clara dominância de ruídos. Este tipo de feição dificulta o estudo do problema do ruído e de casos semelhantes, uma vez que o limiar entre sinal e ruído é pouco nítido, dificultando uma clara separação entre eles.

4.2. Avaliação de Métodos Existentes para Supressão de Ruídos

As primeiras tentativas de minimização dos efeitos de ruídos foram feitas com a adoção de filtros de convolução do tipo passa-baixas. Os primeiros testes mostraram que este tipo filtro não é adequado ao problema de ruídos encontrado nas imagens Geoscan devido à alta complexibilidade desses ruídos.

Uma vez que os ruídos descritos nos espectros das imagens termais do Geoscan apresentam semelhanças estruturais, com variações de intensidade, optou-se inicialmente pela utilização da metodologia estabelecida por Souza Fº *et al.* (1996). Esta metodologia prevê os seguintes requisitos para sua utilização:

(i) subtrair (ou dividir) o espectro de Fourier de duas bandas contendo ruídos com máxima correlação morfológica e mínima correlação de intensidade e, sinais com baixa correlação de intensidade;

(ii) determinar interativamente um limiar entre os níveis de cinza correspondentes ao sinal e ao ruído do novo espectro Fourier gerado pela subtração (ou divisão);

(iii) constituir uma imagem binária na qual a todos os pixels correspondentes aos ruídos é atribuído o valor 0 e ao pixels restantes (i.e.: sinal) o valor 1;

(iv) multiplicar esta 'máscara' binária pelos espectros Fourier originais de todas as bandas.

Os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia mostraram que a mesma não era apropriada para solucionar o problema específico das imagens Geoscan. Os resultados foram positivos em alguns casos, mas em vários outros não. Pode haver várias razões para o insucesso do método, acreditando-se porém, que o principal motivo é alta correlação inter-bandas das bandas termais do Geoscan, ferindo o corolário inserido no requisito do item **(i),** que prevê a utilização de duas bandas com sinais com baixa correlação entre si.

4.3. Novas Propostas Metodológicas

Tornou-se necessária a definição de outra abordagem para resolver o problema. Desse modo, passou-se a elaborar as máscaras binárias individualmente a partir da FFT de cada banda a ser filtrada, conforme relatado por Penteado *et al.* (1997). Também foi proposta a adoção conjunta de um filtro central tipo passa-baixa, para se preservar o sinal do centro do espectro (onde se concentra o sinal).

Os primeiros resultados foram considerados satisfatórios e, a partir disto, duas novas metodologias foram desenvolvidas tomando-se como base o esquema apresentado na **Etapa 2 (II)** da **Figura 3.6**. Nesta etapa é possível a implementação de soluções computacionais diversas como variabilidades e/ou inovações na geração de máscaras e filtros.

4.3.1. Metodologia I

Esta metodologia pode ser implementada a partir dos seguintes passos:

1. Transformação da imagens do domínio espacial para domínio de freqüência e avaliação do espectro de Fourier através da confecção de múltiplos perfis sobre o espectro em diversas posições e direções. Os perfis devem ser elaborados sobre o espectro Fourier após o reescalonamento logarítmico, permitindo assim avaliar o comportamento do atributo Z (amplitude) dos diversos pixels cobertos por estes perfis (alocado sobre o espectro). A partir desses perfis são definidos o *limiar de amplitude* e o *limiar de freqüência* entre o sinal e o ruído. O limiar de amplitude corresponde à amplitude que separa o ruído do sinal quando estes estão superpostos. O limiar de frequência é utilizado para isolar a porção central e corresponde a um raio de um círculo de distribuição dos ruídos a partir do centro do espectro. Este valor representa a distância entre o ponto escolhido para o limiar e o centro do espectro. É necessário considerar que para o cálculo deste limiar os dados do ponto escolhido e do centro do espectro devem estar em unidade "pixel". Para o cálculo do limiar utiliza-se a fórmula abaixo:

$$\left[Lim_freq = \sqrt{(Xp - Xc)^2 + (Yp - Yc)^2} \right], \text{ onde}$$

Lim_freq = limiar de frequencia expresso em unidade pixel,
Xp, Yp = coordenadas X e Y em pixel do ponto de limiar,
Xc, Yc = coordenadas X e Y em pixel do centro do espectro Fourier;

2. Através de filtros apropriados, elaboram-se as máscaras a serem usadas junto com a imagem no domínio de frequência (espectro Fourier) no próximo item. Neste passo, adota-se interativamente os valores de *limiar de amplitude* e *limiar de freqüência*, obtidos no passo anterior;
3. Multiplicação da imagem no domínio de frequência original (espectro Fourier) pela máscara gerada no passo anterior;
4. Aplicação da *Transformada Inversa de Fourier* (IFT), para a conversão da imagem filtrada no domínio de freqüências para o domínio espacial.

Estudo de Caso

A metodologia acima descrita foi aplicada à banda 21 do Geoscan. A **Figura 4.7.a** apresenta o espectro de Fourier desta banda, com a localização de três diferentes perfis situados estrategicamente sobre porções selecionadas deste espectro. A **Figura 4.7.b** ilustra os três diferentes perfis, expondo o comportamento do atributo Z (amplitude) dos pixels amostrados.

No perfil 1, localizado na porção central do espectro, ocorrem concentrações de valores correspondentes ao sinal (pico de frequência do histograma). Neste núcleo a amplitude Z é quase sempre maior que a média dos valores no resto do espectro. Ocorrem intercalações de picos alternados acima e abaixo das média local que representam os ruídos de baixa freqüência que se encontram superpostos ao sinal.

No perfil 2, em uma porção mais distante do centro, ocorrem frequências atribuídas somente aos ruídos. Percebe-se uma alternância constante entre valores que são maiores ou menores que a média do intervalo local. Os valores relativos à cor azul no espectro da **Figura 4.7.a,** coberto por este perfil, apresentam amplitude que em média são mais baixas que os valores dos pixels representados pela cor amarela destes espectro, apresentando amplitudes médias maiores. Dentro da faixa relativa à cor amarela, percebe-se uma alternância de valores maiores e menores, demostrando a existência da frequência oscilatória característica de ruído. O perfil 3 mostra uma faixa de transição de valores com predomínio do sinal espectral relativos á superfície imageada (perfil 1), para valores quase somente relativos a ruídos (perfil 2).

Nestes perfis é possível determinar a localização de pontos (setas verdes nas **Figuras 4.7.a e 4.7.b**) dentro do espectro (com coordenadas X e Y em pixels) onde se percebe uma separação da ocorrência de sinal e de sinal mais ruído. Este ponto pode ser definido como o *limiar de frequência*.

Outro ponto de separação entre ruído e sinal é feito a partir da amplitude (atributo Z) dos diversos pixels avaliados. Com este outro ponto pode ser definido o *limiar de amplitude* (linhas vermelhas na **Figura 4.7.b**, perfis 2 e 3), com valores correspondentes ao intervalo do perfil avaliado.

4.3.2. Metodologia II

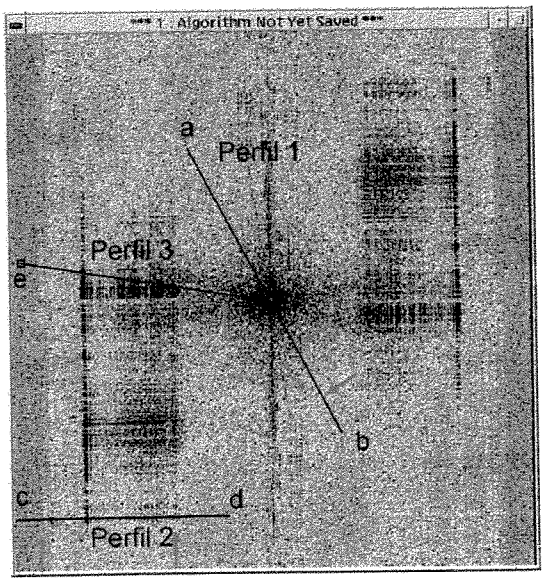
A segunda metodologia, embora muito semelhante à primeira, permite a eliminação de uma etapa, proporcionando um ganho substancial no tempo de processamento. Ela prevê a minimização de ruídos com a operação direta do espectro Fourier de uma imagem. Neste caso, diferentemente do primeiro método, não é necessário gerar uma máscara independente na linha de processamento, nem tampouco proceder à multiplicação do mesmo pelos espectros de Fourier de cada imagem.

Duas diferenças básicas em relação à metodologia anterior são: (i) os perfis a serem elaborados devem ser confeccionados sobre o espectro Fourier sem o reescalonamento logarítmico. Este procedimento permite a visualização da distribuição original da amplitude, que se apresenta distribuída em valores de amplitudes positivos e negativos e centrados no zero; (ii) agora são definidos dois limiares de intensidade, um positivo e outro negativo e iguais em módulo, a depender do tipo de filtro central adotado. Também são definidos dois ou mais limiares de freqüência, comentados mais adiante. A aplicação desta metodologia se dá através dos seguintes passos:

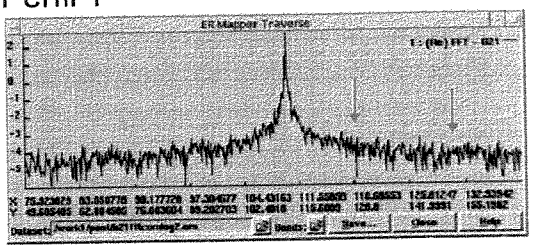
1. Transformação da imagens espacial para domínio de freqüência e avaliação do espectro de Fourier através da confecção de múltiplos perfis sobre o espectro em posições e direções variadas. Este espectro deve estar sem o reescalonamento logarítmico. A partir destes perfis deverão ser definidos os *limiares de amplitude* e *limiares de frequência* entre o sinal e o ruído;
2. Filtragem dos intervalos de freqüência indesejados com a adoção de filtros que fazem a operação de filtragem direta sobre a imagem no domínio de frequência (espectro Fourier) avaliado. Ao contrário da metodologia anterior, onde nesta etapa o filtro seria utilizado para a confecção de uma máscara, aqui o espectro é diretamente o transformado com a adoção interativa de valores dos *limiares de amplitude* e *limiares de frequência*, obtidos na etapa anterior;
3. Aplicação de uma Transformada Inversa de Fourier (IFT), para a conversão da imagem filtrada no domínio de freqüências para o domínio espacial.

Estudo de Caso

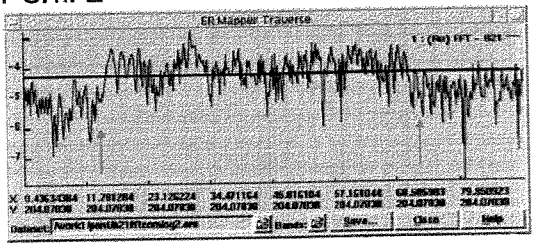
Da mesma forma que a anterior, a metodologia acima foi também aplicada à banda 21. A definição do(s) limiar(es) de frequencia é feito da mesma forma como na metodologia anterior (item **4.2.1**). Nesta, porém, a diferença é a definição dos limiares de intensidade. Aqui são definidos dois valores (**Figura 4.8**), considerando-se cortes simultâneos de amplitudes excessivamente positivas e negativas.



Perfil 1



Perfil 2



Perfil 3

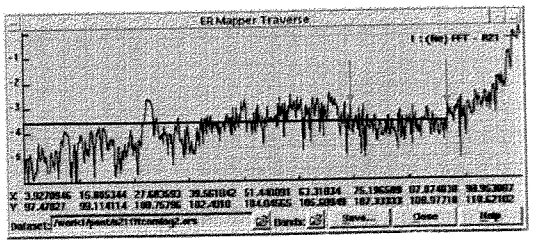


Figura 4.7: **(a)** (acima): Espectro Fourier da banda 21 com a localização dos três perfis estudados; **(b)** (direita): Os três perfis com os limiares de frequência (setas verdes) e de amplitude (linhas vermelhas). Nos três perfis, o lado esquerdo respectivamente é referente às letras (a), (c) e (e).

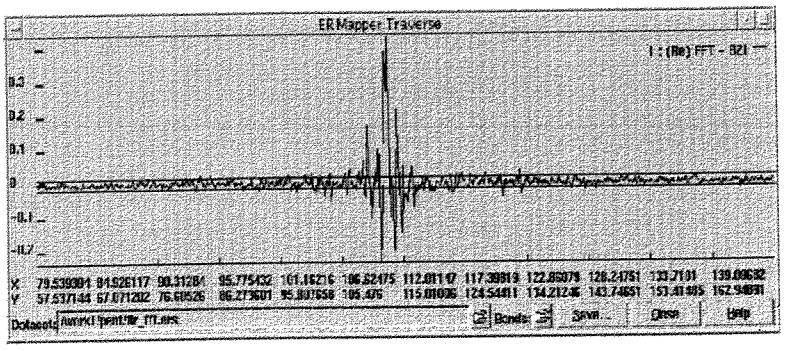


Figura 4.8: Perfil confeccionado sobre o espectro Fourier da banda 21, sem o reescalonamento logarítmico. Ao contrário dos perfis da **Figura 4.7.b**, este apresenta os valores de amplitude em torno do zero. Qualquer variabilidade passa para o campo positivo ou negativo. Linhas vermelhas indicam os limiares de intensidade.

4.4. Desenvolvimento de Filtros Sintonizáveis

As metodologias apresentadas anteriormente possibilitaram a construção de diferentes tipos de filtros sintonizáveis desenvolvidos sob a forma de sub-rotinas escritas na linguagem de programação macro do software ERMapper. Estas macros são adicionadas ao ERMapper através da janela *Formula Editor* (**Figura 4.9**) e possibilita a criação de variáveis de controle ou parâmetros próprios. Para execução da macro basta acionar o comando **GO** do ERMapper e a macro é automaticamente executada e o resultado apresentado em vídeo em uma janela específica.

Estes filtros sintonizáveis são na verdade, uma mistura de dois tipos diferentes de filtros: (**i**) filtros passa-baixa, com ajustes gradacional ou não e; (**ii**) filtros de intensidade para serem utilizados no resto do espectro que não a parte central coberta pelo filtro anterior. No caso (**i**), quando são utilizadas filtragens gradacionais, existe um intervalo definido ente dois limiares de freqüência onde é feito uma filtragem conjunta entre (**i**) e (**ii**). Neste caso, todos os valores que forem superiores aos limiares de amplitude são amenizados segundo um fator escalar, a depender da distância entre os dois limiares de freqüências definidos. No centro do espectro, na parte interna do limiar de freqüência menor, todo o sinal é mantido inalterado.

O primeiro filtro central elaborado foi do tipo quadrado, que muito embora rudimentar e primitivo, possibilitou a preservação do sinal espectral contido nas imagens (Penteado et al., 1997). Outros dois filtros foram desenvolvidos subseqüentemente, como aperfeiçoamento deste primeiro, e são do tipo circular e circular com atenuante gradacional (com dois limiares de freqüência). O último filtro foi elaborado segundo a Metodologia II (item **4.3.2**) e opera diretamente os valores no espectro original.

4.4.1. Filtro Sintonizável Quadrado

O filtro sintonizável quadrado prevê a preservação da região central do espectro com uma máscara binária com um quadrado central com valor 1. Este quadrado pode representar qualquer distância a partir do centro (ou origem) do espectro.

A construção da máscara com o quadrado requer que o usuário estabeleça o número de pixels de meio lado do quadrado desejado considerando seu centro a partir da origem do espectro

Fourier. Na porção externa ao quadrado a filtragem é feita considerando-se o limiar de amplitude onde tudo que for maior que este limiar é convertido para zero na máscara.

A **Listagem 4.1** apresenta o algoritmo em linguagem de macro do ERMapper para a preservação central do espectro segundo uma figura quadrada. No algoritmo existem duas variáveis de controle a serem informadas pelo usuário com o *limiar de amplitude* e o *limiar de frequência* desejados. Estes devem ser introduzidos respectivamente nos campos denominados ***limiar*** e ***nrpixels***.

Após a introdução dos limiares executa-se o algoritmo, a partir do qual obtém-se a máscara binária pretendida. No centro da máscara, em forma de quadrado, o valor é 1, enquanto que no resto o valor é zero ou 1, a depender do limiar de intensidade. O processo de ajuste da dimensão ideal para o filtro é feito interativamente, modificando-se os valores nestes campos de preenchimento.

Para exemplificar a aplicação deste filtro foi utilizado o espectro Fourier da banda 21 (**Figura 4.10.a**). As concentrações de maior intensidade no centro e em porções distais do espectro desta figura representam sinal + ruído e somente ruído, respectivamente. As altas amplitudes apresentam cor cinza mais clara, tendendo ao branco.

A máscara obtida a partir da utilização deste filtro encontra-se ilustrada na **Figura 4.10.b**, que apresenta pixels pretos que correspondem a DN=0, e pixels brancos que correspondem a DN=1. Observa-se que a máscara desenvolvida a partir do filtro sintonizável quadrado impede que as baixas e médias freqüências (i.e., componente mais importante do sinal da imagem) sejam filtradas durante a multiplicação da máscara pelo espectro correspondente.

Os testes elaborados com este filtro mostraram resultados pouco satisfatórios mas indicaram que a estratégia adotada poderia ser melhor explorada. As **Figuras 4.11.a** e **4.11.b** apresentam as bandas 21 e 24 originais (com ruído) e as **Figuras 4.11.c** e **4.11.d** estas mesmas imagens, agora filtradas com o filtro sintonizável quadrado e com a máscara binária originada a partir deste filtro.

Nota-se que embora o ruído tenha sido atenuado, artefatos reliquiares podem ainda ser observados nas imagens. Além disto, é notório um realce houve um melhoramento do sinal nestas imagens, mostrando com mais clareza detalhes espectrais que antes da filtragem encontravam-se camuflados pelo ruído.

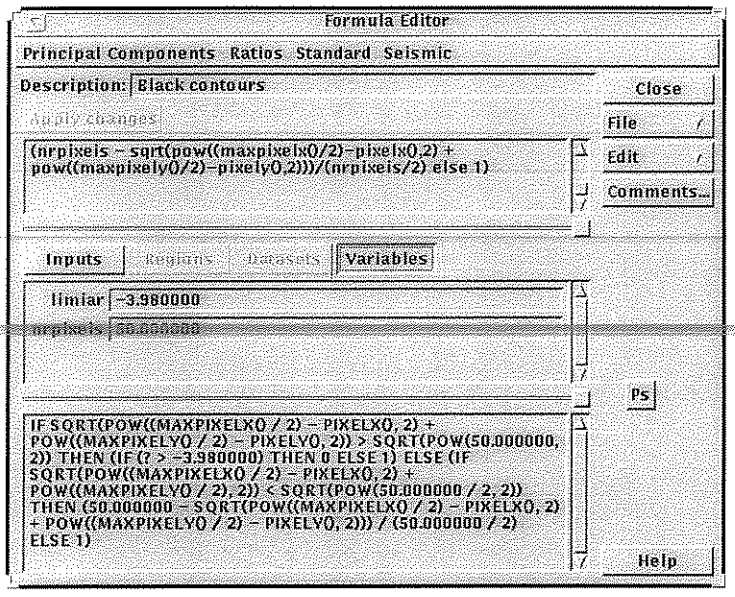


Figura 4.9: Esquema da janela *Formula Editor* do ER Mapper, com um exemplo de macro no retângulo superior. Exemplo de macro para confecção de uma máscara com as variáveis de controle **limiar** e **nrpixeis**.

```
**********************************************************
IF
   sqrt ( pow ( ( maxpixelx()/2) – pixelx(),2 )  +   pow ( ( maxpixely()/2) – pixely(),2 ))
    >
   sqrt ( pow ( nrpixeis,2 ))
THEN
   (if  (INPUT1 > limiar)  then  0  else  1)
ELSE
   (if
         sqrt ( pow ( ( maxpixelx()/2) – pixelx(),2 )  + pow ( ( maxpixely()/2) – pixely(),2 ))
         <
         sqrt ( pow ( nrpixeis/2,2))
    then
        (nrpixeis – sqrt ( pow ( ( maxpixelx()/2) – pixelx(),2) + pow ( ( maxpixely()/2) – pixely(),2)))
        /
        (nrpixeis/2)
    else
        1)
**********************************************************
```

Listagem 4.1: Listagem da macro com as variáveis de controle (**nrpixeis, limiar**) para elaboração de um filtro sintonizável quadrado e a máscara correspondente.

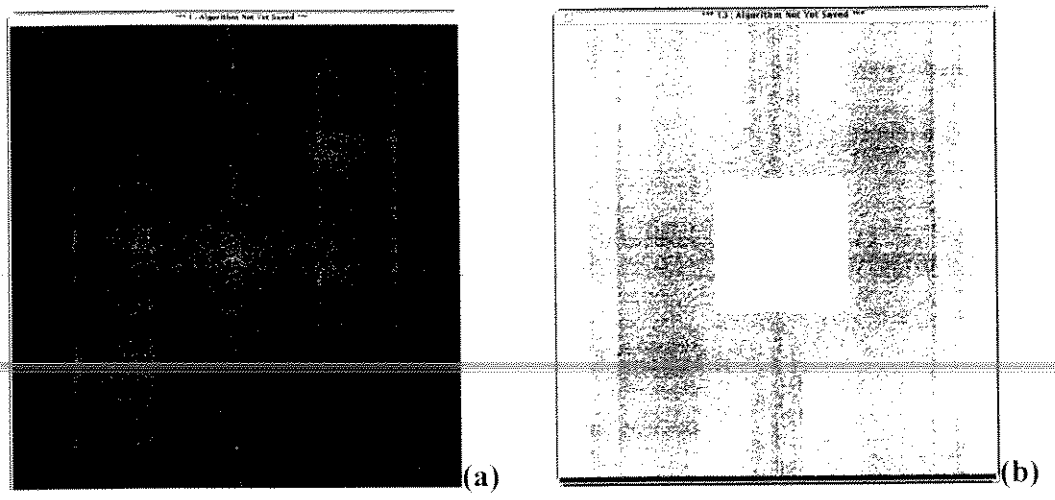


Figura 4.10: (a) Espectro Fourier da banda 21 em tons de cinza. **(b)** Máscara quadrada elaborada a partir do espectro da banda 21.

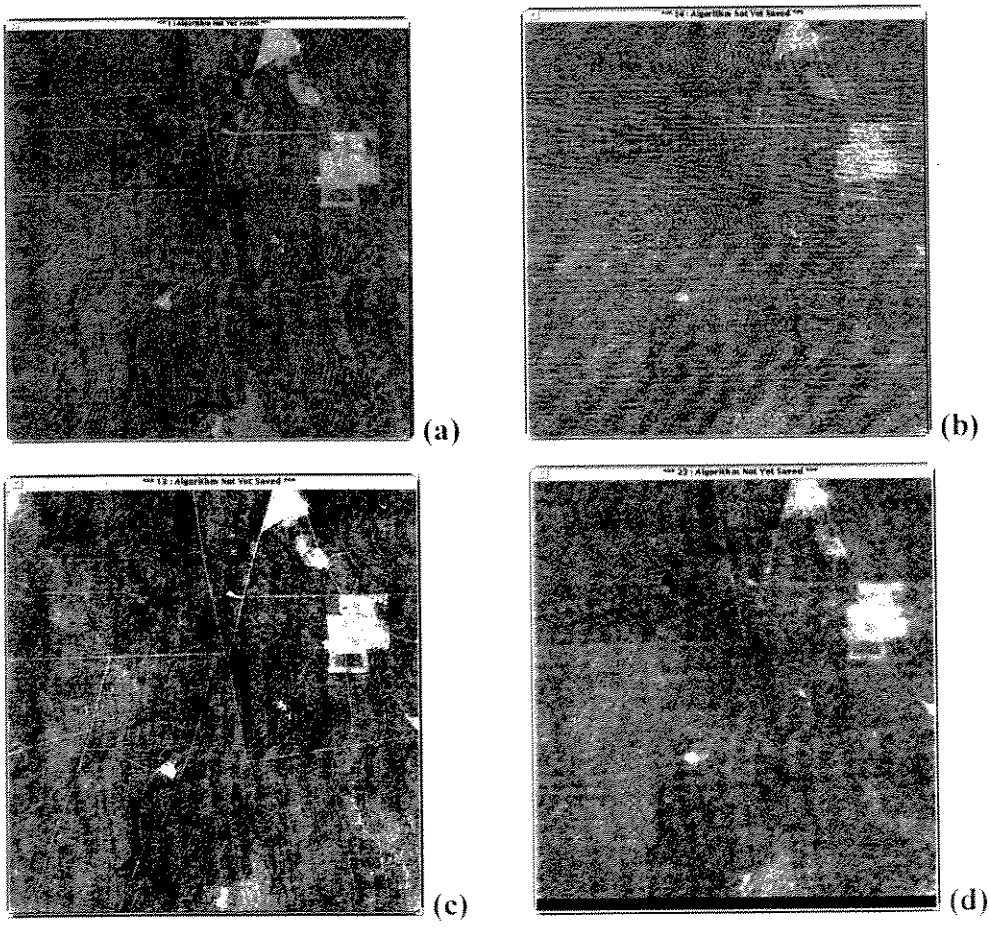


Figura 11: Bandas 21 **(a)** e 24 **(b)** originais. Notar a presença de ruídos principalmente na banda 24. Bandas 21 **(c)** e 24 **(d)** filtradas com a máscara gerada pelo filtro sintonizável quadrado. Notar ainda a presença de alguns ruídos de baixa freqüência que não foram atenuados.

4.4.2. Filtro Sintonizável Circular

O filtro sintonizável circular permite a preservação da região central do espectro através de uma máscara binária com um círculo central com valor 1. Este circulo pode apresentar qualquer raio a partir do centro (ou origem) do espectro. A construção da máscara com o círculo requer que o usuário estabeleça o número de pixels do raio do círculo desejado, considerando seu centro a partir da origem do espectro Fourier. Na porção externa ao círculo a filtragem é feita considerando-se o limiar de amplitude, onde tudo que for maior que este limiar é convertido para zero na máscara.

A **Listagem 4.2** apresenta o algoritmo em linguagem de macro do ERMapper para a preservação central do espectro segundo uma figura circular. No algorítmo existem duas variáveis de controle a serem informadas pelo usuário com o limiar de amplitude e o limiar de frequência desejados respectivamente. Estes devem ser introduzidos nos campos denominados ***limiar*** e ***nrpixels***.

Após o estabelecimento dos limiares executa-se o algorítmo, a partir do qual obtém-se a máscara binária pretendida. No centro da máscara em forma de círculo o valor é 1, enquanto que no resto o valor é zero ou 1, a depender do limiar de intensidade. O processo de ajuste da dimensão ideal para o filtro é feito interativamente, modificando-se os valores nestes campos de preenchimento.

```
                ********************************************************
IF
   sqrt ( pow (( maxpixelx()/2) – pixelx(),2 )  +   pow (( maxpixely()/2) – pixely(),2 ))
    >
   sqrt ( pow ( nrpixeis,2 ))
THEN
   ( if  (INPUT1 > limiar)  then   0  else  1 )
ELSE
   1
                ********************************************************
```

Listagem 4.2: Listagem da macro com as variáveis de controle (**limiar, nrpixeis**) para elaboração de um filtro sintonizável circular e a máscara correspondente.

A máscara obtida a partir da utilização deste filtro encontra-se ilustrada na **Figura 4.12**, que apresenta pixels azuis correspondentes a DN=0, e pixels vermelhos, correspondentes a DN=1.

Observa-se que a máscara desenvolvida a partir do filtro sintonizável circular impede que as baixas e médias freqüências (i.e., componente mais importante do sinal da imagem) sejam filtradas durante a multiplicação da máscara pelo espectro correspondente.

Os resultados obtidos com este último filtro foram melhores do que aqueles obtidos com o filtro anterior, uma vez que a geometria circular recobre melhor a concentração de pixels no centro do espectro, que geralmente apresenta geometria semi circular.

4.4.3. Filtro Sintonizável Circular Com Gradiente de Atenuação

O filtro sintonizável circular com gradiente de atenuação prevê a preservação da região central do espectro com uma máscara sintonizável circular, onde a partir de um determinado raio, os valores entre 0 e 1 são gradativamente atenuados. Este filtro não requer a utilização máscaras binárias.

Durante a confecção da máscara, o limiar de amplitude é avaliado dentro do intervalo delimitado por dois círculos. Caso a amplitude do espectro seja maior que o limiar de amplitude, este ponto é automaticamente convertido para 0 na máscara. Caso esta amplitude seja menor, determina-se automaticamente a posição radial do ponto entre os dois círculos que delimitam o intervalo e calcula-se um valor interpolado entre zero e um. Este valor é então transferido para a máscara. Uma síntese desta operação é exemplificada na **Figura 4.13**. Nota-se ainda que externamente ao círculo maior os valores são convertidos para 0 ou 1 a depender do limiar de amplitude, enquanto que internamente ao círculo menor todos os valores são convertidos para 1.

A **Listagem 4.3** apresenta o algoritmo em linguagem de macro do ERMapper para a preservação do espectro central segundo uma figura circular com atenuação das freqüências entre os intervalos delimitados por dois círculos centrados na origem do espectro. No algorítmo existem três variáveis de controle a serem informadas pelo usuário com o limiar de amplitude e os limiares de frequência desejados para o círculo externo e interno. Estes devem ser introduzidos respectivamente nos campos denominados **limiar** e **nrpix_ext** e **nrpix-int**.

Assim como nos filtros anteriores, após fornecer os valores, executa-se o algoritmo, produzindo-se uma máscara circular central e homogênea servida com círculos com o DN dos pixels envolvidos gradacionalmente atenuados (com variação de cores em representação

pseudocor). Isto é feito de forma torna esta tarefa interativa, até ajustar-se os círculos perfeitamente sobre o local desejado.

Aplicou-se o filtro acima descrito na banda 21 (**Figura 4.14.a)**. Nota-se as três faixas de ruídos em vermelho e amarelo e a informação espectral concentrada radialmente em torno da origem do espectro. A **Figura 4.14.b** mostra a máscara obtida com a utilização do filtro sintonizável circular com atenuante gradacional.

Nesta figura a região entre os dois círculos, mostra uma gradação entre um azul bem claro, passando pelo verde e pelo amarelo, atingindo o vermelho. Neste intervalo atuaram conjuntamente, durante a confecção da máscara, um filtro atenuante gradacional, baseado nos limiares de freqüência e um filtro de amplitude. Desta forma, para valores abaixo do limiar de amplitude, foi ativado o filtro atenuante gradacional e, acima do limiar de amplitude, foi ativado o filtro de amplitude, ocasionando a conversão destes valores para zero na máscara.

Neste filtragem ocorreu ainda a conversão automática dos valores para 1 na máscara gerada (cor vermelha), enquanto que fora do círculo externo prevaleceu a filtragem com limiar de amplitude, ocasionando pixels azulados (DN=0) em um fundo vermelho (DN=1).

A **Figura 4.14.c** mostra o resultado da multiplicação da banda 21 original no domínio de frequência (espectro Fourier) (**Figura 4.14.a**) pela máscara da Figura **4.14.b**. Nota-se a significativa diminuição da intensidade relativa dos ruídos de alta e média frequência. Concomitantemente a esta filtragem, a maior parte da informação contida na região central do espectro Fourier foi preservada. Nota-se também nesta figura que apesar da remoção de grande parte do ruído, ainda existe uma certa quantidade de ruído presente que não foi efetivamente retirada pelo fato de que os valores definidos para os limiares ainda não foram adequados.

O resultados desta atenuação de ruídos no espectro Fourier da banda 21, com a utilização deste filtro e da máscara gerada, encontra-se ilustrado na **Figura 4.15** sob a forma de *zoom* de uma pequena porção da área estudada. Na **Figura 4.15.a** é mostrada a porção da imagem com ruídos, enquanto que a **Figura 4.15.b** é mostrada a mesma na imagem filtrada com menor quantidade de ruídos. Muito embora a remoção de ruídos não tenha sido completa, percebe-se na imagem resultante uma nítida diminuição da superposição do ruído sobre o sinal espectral.

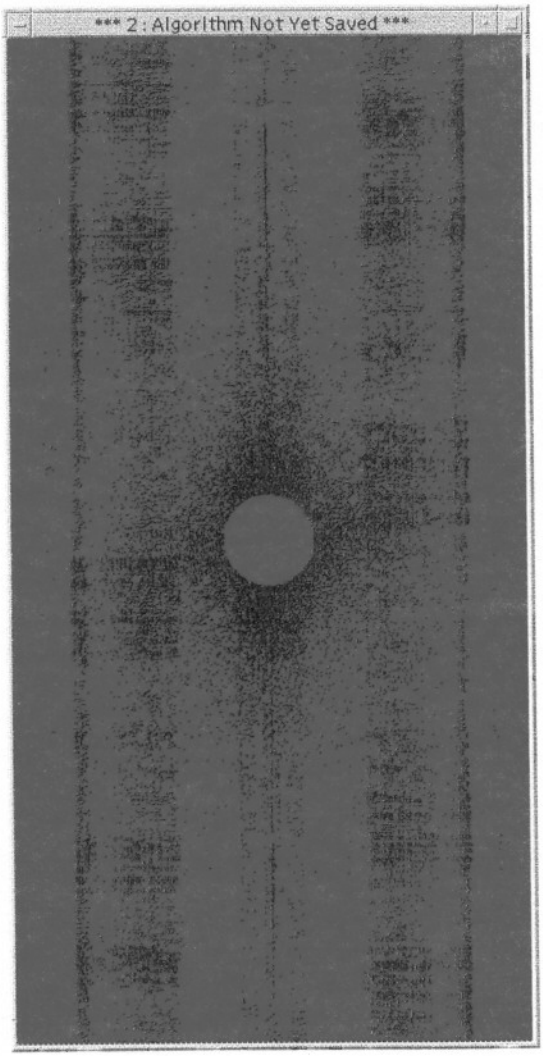
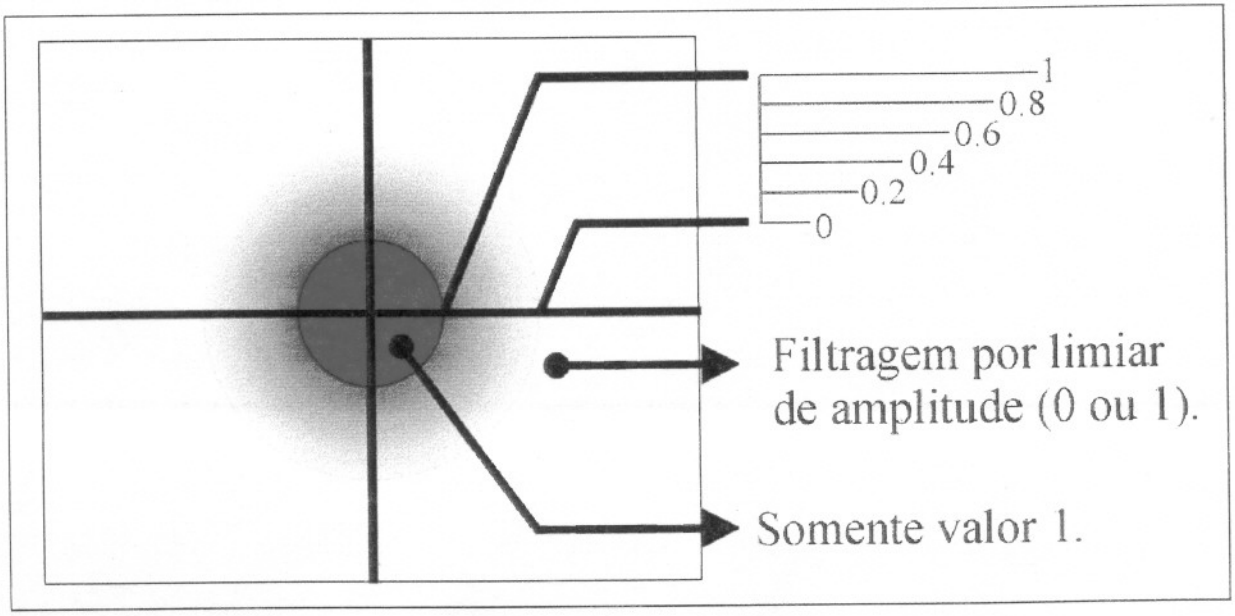


Figura 4.12 (ao lado): Máscara obtida com a aplicação do filtro sintonizável circular. Os pixels em vermelho e azul apresentam DN igual a 1 e 0, respectivamente. Observa-se na região central do espectro o formato circular que preservará o sinal da imagem durante a multiplicação deste pelo espectro correspondente.

Figura 4.13 (abaixo): Atenuação gradacional dos valores delimitados entre os dois círculos. A distribuição dos valores entre 0 e 1 é homogênea. Aqui encontra-se representada por intervalos de 0.2.



```
                ******************************************************
IF
   sqrt ( pow ( ( nrcols ()/2) – cellx(),2 )  +   pow ( ( nrrows()/2) – celly(),2 ))
    >
   sqrt ( pow ( nrpix_ext,2 ))
THEN
   (if  (INPUT1 > limiar)  then  0  else  1)
ELSE
   ( if
         sqrt ( pow ( ( nrcols()/2) – cellx(),2 )  + pow ( ( nrrows()/2) – celly(),2 ))
         >
         sqrt ( pow ( nrpix_int/2,2))
    then
         ( if
               (INPUT1 > limiar)
          then
              (
               ( nrpix_ext - sqrt ( pow ( ( nrcols()/2) – cellx(),2 ) + pow ( ( nrrows()/2) – celly(),2 ))
                /
               ( nrpix_ext – nrpix_int )
              )
         else
              1
         )
    else
         1
  )
                ******************************************************
```

Listagem 4.3: Listagem da macro com as variáveis de controle (**limiar, nrpix_ext, nrpix_int**) para elaboração de um filtro sintonizável circular gradacional e a máscara correspondente.

4.4.4. Operador Circular Com Atenuante Gradacional

Este operador funciona de forma semelhante ao filtro anterior (item **4.4.3**), com a diferença que, ao invés de ser gerada uma máscara, é o próprio espectro que é modificado. Diferente também é o fato de que agora são informados pelo usuário dois limiares de amplitude (um positivo e outro negativo). Isto advêm do fato que estudo de casos com perfis foram reordenado para espectro Fourier de imagens sem o reescalonamento logarítmico. Desta forma a distribuição dos valores de DN dos pixels do espectro Fourier original encontram-se igualmente distribuídos ao longo da amplitude 0 e próximo dela (**Figura 4.4.a**) possibilitando a definição de dois valores aproximadamente iguais em módulo para os limiares de amplitude

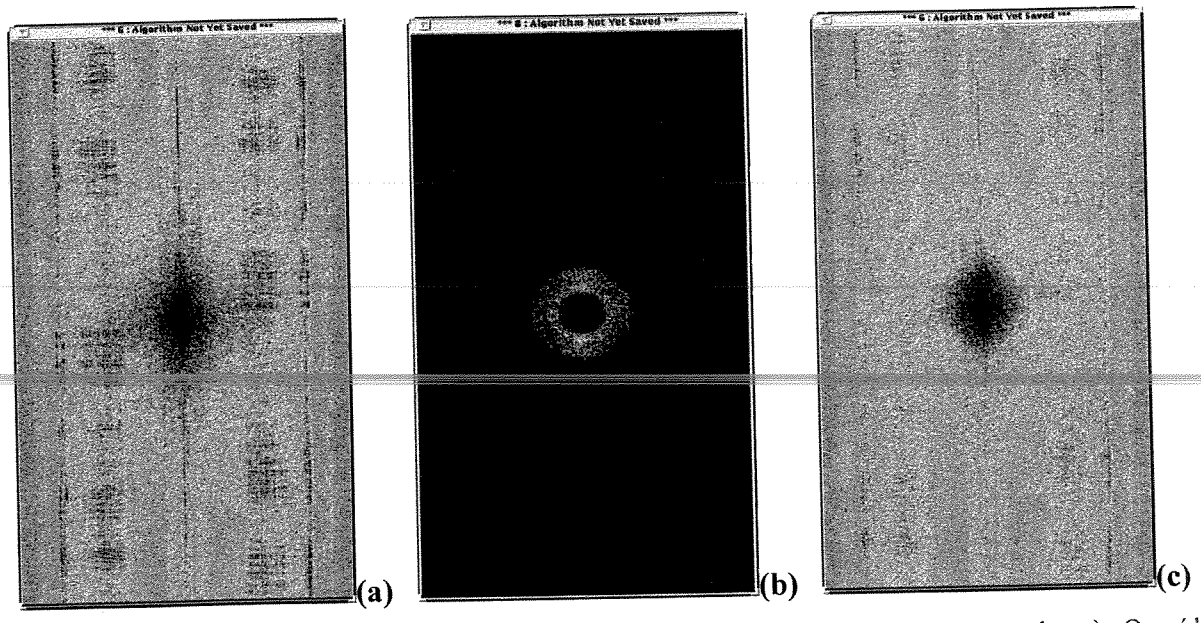
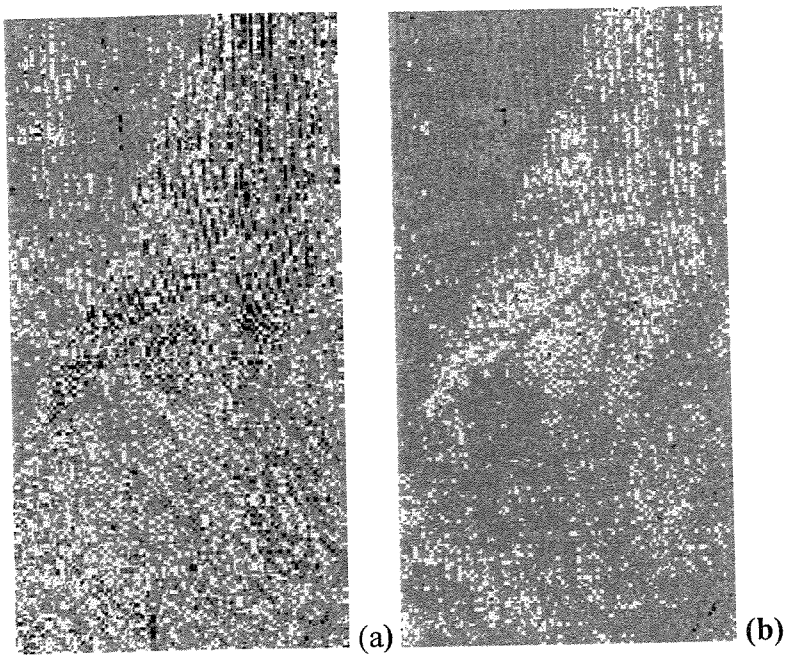


Figura 4.14: **(a)** Espectro Fourier da banda 21 (com reescalonamento logarítmico e pseudocor). O ruído encontra-se nas faixas em vermelho e amarelo; sinal espectral na região central em vermelho gradando para amarelo ao se afastar da origem do espectro. Valores de fundo em cor azul a verde representam porção do espectro sem ou com muito pouca informação; **(b)** máscara obtida com o filtro circular com atenuante gradacional. Vermelho representa DN=1 e azul DN=0. Variações entre círculos interno e externo representam valores entre 0 e 1; **(c)** Espectro Fourier após multiplicação pela máscara. Notar a minimização de freqüências relativas aos ruídos e preservação da porção central.



Figuras 4.15: Detalhe de uma mesma porção (zoom) da área estudada na banda 21(domínio espacial) para exemplificar os resultados da aplicação deste filtro. Representação em pseudocor. **(a)** Imagem original; **(b)** Imagem filtrada.

A **Listagem 4.4** apresenta o algoritmo em linguagem de macro do ERMapper para a operação direta do espectro a ser filtrado preservando-se a região central de forma semelhante ao filtro anterior. No algorítmo existem quatro variáveis de controle a serem informadas pelo usuário, com os limiares de amplitude e os limiares de frequência. Estes devem ser introduzidos respectivamente nos campos denominados **highlim**, **lowlim**, **nrpix_ext** e **nrpix_int**. O resultado obtido com este operador não é mais uma máscara, e sim o mesmo espectro Fourier, agora com freqüências indesejadas minimizadas e/ou eliminadas.

Além da flexibilidade e velocidade de processamento, a utilização deste operador resultou em filtragens efetivas do ruído. Um exemplo disto pode ser observado nas Figuras **4.16.a** e **4.16.b**.

4.5. Filtragem das Bandas Termais

No caso específico das imagens que recobrem a área de estudo, os problemas com ruídos não são tão efetivos como observados em outras porções do greenstone belt. Isto possibilitou que algumas das bandas Geoscan (16, 17 e 18) pudessem ser utilizadas na avaliação da informação geológica, sem a necessidade de minimização de ruídos.

Das seis bandas termais, as de número 19, 20 e 22 foram as que apresentaram menores problemas com a presença de ruídos. Destas, a de número 22, quando filtrada, apresentou melhora significativa de qualidade em relação à original, enquanto que nas de número 19 e 20 esta melhora já não foi muito significativa em relação ao dado original. Isto se deve ao fato de que nestas duas bandas, apesar da existência de ruídos, estes não afetam significativamente o conteúdo total original. A remoção dos ruídos nestas bandas, por mais efetiva que sejam, mostram-se muito sutil em relação à imagem original.

As bandas 21, 23 e 24, apresentaram maiores problemas com ruído e a minimização dos mesmos mostraram-se bastante significativas em relação aos dados originais. Estas três imagens apresentavam originalmente claro prejuízo da informação espectral em função da quantidade de ruídos presente, principalmente a banda 24. Este fato, além de evidenciado na prática, foi exposto e comentado respectivamente na **Figura 4.6** e item **4.1.3**.

```
*********************************************************
IF
   sqrt ( pow ( ( nrcols ()/2) – cellx(),2 )  +   pow ( ( nrrows()/2) – celly(),2 ))
    >   sqrt ( pow ( nrpix_ext,2 ))
THEN
     (if      (INPUT1 > lowlim or INPUT1 > highlim)
      then   (if INPUT1 <  0   then lowlim else  highlim)
      else    INPUT1)
ELSE
     ( if
           sqrt ( pow ( ( nrcols()/2) – cellx(),2 )  + pow ( ( nrrows()/2) – celly(),2 ))
           >   sqrt ( pow ( nrpix_int/2,2))
      then
          ( if       (INPUT1 < lowlim or INPUT1 > highlim)
            then   ((( nrpix_ext - sqrt ( pow(( nrcols()/2) – cellx(),2 ) + pow(( nrrows()/2) – celly(),2 )))
                     /  ( nrpix_ext – nrpix_int )  *   INPUT1))
            else    INPUT1)
      else
            INPUT1)
                  *********************************************************
```

Listagem 4.4: Listagem da macro com as variáveis de controle (**lowlim, highlim, nrpix_exts, nrpix_int**) para o operador sintonizável circular gradacional.

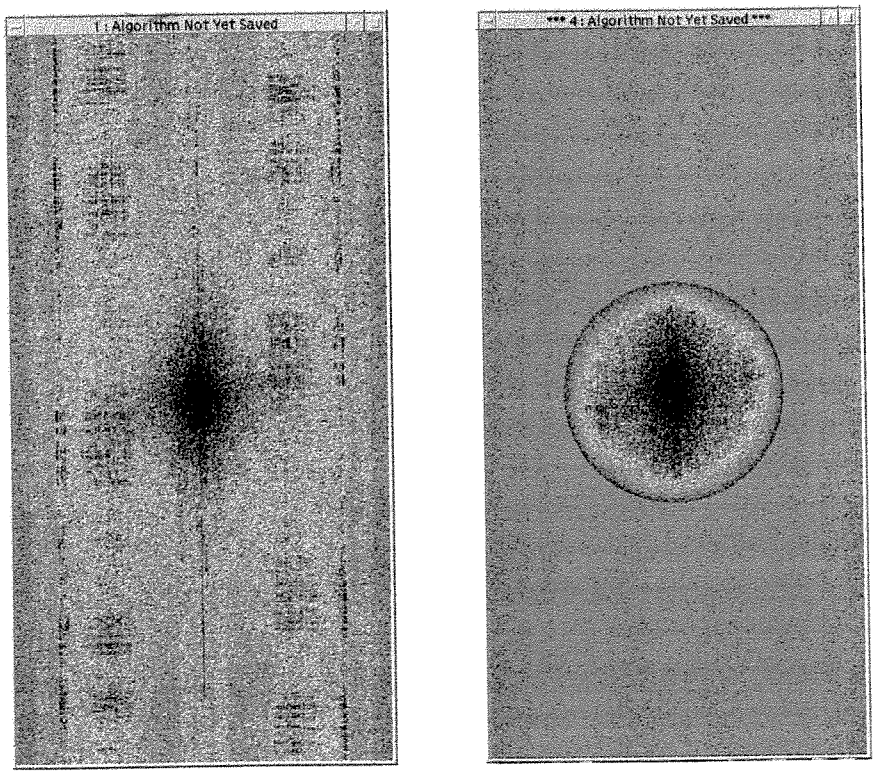


Figura 4.16:
(a): (esquerda) Espectro Fourier da banda 21 original, ruidosa.
(b): (direita) Espectro Fourier da banda 21, com operador circular zonal aplicado. Nota-se uma significativa diminuição das três faixas verticais e a preservação da região central a partir de um formato circular com zoneamento gradacional.

Destas bandas, a 24 foi apenas moderadamente filtrada em função do claro prejuízo que o sinal espectral contido sofreu quando tentou-se eliminar uma grande quantidade de ruído. O sinal espectral contido acabou por ser muito afetado inviabilizando seu posterior uso em outras aplicações.

Todos os filtros desenvolvidos foram testados nas seis bandas termais, sendo que a cada novo desenvolvimento os resultados mostraram-se melhores que os anteriores. Sendo assim, estas seis bandas foram filtradas com o último filtro desenvolvido (denominado Operador Circular Com Atenuante Gradacional e apresentado no item **4.4.4.**), objetivando-se a posterior utilização das mesmas em atividades de processamento digital de dados orientado à caracterização de zonas possivelmente mineralizadas a ouro através da identificação de faixas ricas em assembléias de minerais hidrotermais.

4.6. Discussão

Dos casos avaliados, o que apresentou maior problema foi o da banda 24, que encontra-se bastante corrompida por ruídos. Nesta banda, a minimização de ruídos foi mais agressiva com a utilização de limiares reduzidos, ocasionando uma remoção efetiva de grande quantidade de ruído presente. Porém, devido à baixa razão sinal/ruído, a filtragem de ruídos com limiares reduzidos acabou por ocasionar também grandes perdas de informação espectral de interesse, comprometendo o uso desta banda em etapas de processamento posteriores.

O estudo do comportamento da amplitude (atributo Z) dos diversos espectros Fourier analisados permitiu concluir que os valores relativos ao sinal diferem daqueles relativos aos ruídos. Os ruídos ocasionam feições oscilatórias com comportamento diferente do sinal. Esta diferença é bem evidenciada na região central dos espectros avaliados, onde ocorrem valores medianamente positivos do sinal e intensas oscilações acima e abaixo desta média, possibilitando a identificação de intervalos de frequência onde a influência de ruídos é maior ou menor.

O desenvolvimento de novos filtros ocorreu com o sucessivo melhoramento do primeiro filtro desenvolvido. A proposta inicial visava um filtro complexo, sendo que este foi desenvolvido em passos sucessivos. O melhoramento sucessivo permitiu também verificar que podem ser desenvolvidas variantes destes filtros, originalmente propostos para atender

problemas mais específicos de outros tipos de ruídos, em outros tipos de imagens de sensoriamento remoto.

A partir da proposição metodológica **II** (item **4.3.2**) e do operador circular com atenuante gradacional (item **4.4.4**), foram elaboradas outras variantes mais complexas com a definição de diferentes limiares de intensidade para intervalos delimitados por mais de dois círculos. Devido a limitação de tempo, estas variações não puderam ser totalmente avaliadas. Porém, os testes iniciais mostraram-se promissores, indicando que novas investigações podem e devem ser feitos nesta linha em pesquisas futuras.

CAPÍTULO 5

PESQUISA AURÍFERA NO GREENSTONE BELT DO RIO ITAPICURU

5.1. O Sensoriamento Remoto e a Exploração Aurífera

Além da discriminação dos diferentes litotipos ígneos, sedimentares e metamórficos da superfície terrestre para mapeamento geológico, dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados com êxito na detecção de zonas de alteração hidrotermal. A identificação de minerais de alteração hidrotermal, produzidas por silicificação e carbonatação, pode ser feita na porção TIR. Estes resultados, associados aos obtidos com a detecção de minerais férricos, minerais com a molécula hidroxila e carbonatos dentro das faixas VNIR e SWIR, aumenta o potencial de caracterização de zonas hidrotermalizadas a partir de dados de sensoriamento remoto.

Alguns trabalhos envolvendo a utilização de dados do Landsat TM na caracterização de zonas de alteração hidrotermal foram elaborados por Crósta & Moore (1989), Loughlin (1991) e Crósta & Rabelo (1993). Spatz (1996) define critérios para utilização de dados de sensoriamento remoto em atividades exploratórias em escala regional ou em escala de depósitos, a depender da resolução espacial do dado utilizado. Este autor considera os principais enfoques a serem abordados quanto ao tipo de dado e objetivos perseguidos.

Além destes, outros estudos envolvendo bandas termais e a caracterização de zonas de alteração hidrotermal foram feitos com dados adquiridos com o sensor termal multiespectral TIMS (Kahle & Goetz, 1983). Kahle & Rowan (1980) diferenciaram três grupos sedimentares Paleozóicos e quatro diferentes tipos de alteração hidrotermal na região de East Tintic Mountain, Utah, EUA, utilizando um protótipo do TIMS.

Dentre os trabalhos utilizando o Geoscan em exploração mineral encontram-se o de Agar (1994), que testou e avaliou a utilização de dados termais para prospecção aurífera e de diamantes em diferentes regiões da Austrália, o de Lockett et al. (1993) com dados do Geoscan no *greenstone belt* do Rio Itapicuru (Bahia - Brasil), e também os de Hernandes (1994), Crósta et al. (1996), Prado (1997) e Prado & Crósta (1997), todos desenvolvidos com os dados adquiridos sobre regiões do Brasil, orientados à caracterização de zonas mineralizadas hidrotermalmente. Segundo estes últimos autores, os dados do Geoscan

revelaram importantes anomalias minerais, com a identificação de óxidos e hidróxidos de ferro e argilo-minerais.

Relato comum em todos os trabalhos executados com dados Geoscan é o fato de que as bandas termais foram até então pouco exploradas. Apesar da faixa TIR ainda estar sendo pouco explorada, um número razoável de trabalhos já realizados mostra o grande potencial que há nesta região espectral para fins geológicos, incluindo principalmente a prospecção aurífera.

5.2. Processamento Digital das Imagens Geoscan

Neste trabalho, técnicas de processamento foram aplicadas aos dados Geoscan visando a delimitação de diferentes unidades geológicas e a identificação de regiões com anomalias espectrais relacionadas a minerais de alteração hidrotermal (possíveis indicadores de mineralizações auríferas). As técnicas utilizadas, bem como os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.2.1. Composições Coloridas RGB

As primeiras avaliações com as bandas Geoscan basearam-se em composições coloridas tipo RGB com bandas simples, às quais aplicou-se diferentes tipos de aumento de contraste. Dentre as técnicas de aumento de contraste a mais empregada foi do tipo linear, com saturação de 0,5% nas extremidades. As bandas utilizadas nestas composições coloridas foram selecionadas com base nos trabalhos de Lockett et al. (1993) e Agar (1994), que utilizaram o Geoscan na caracterização de anomalias associadas a zonas com mineralizações auríferas.

A composição com as bandas do visível, 3,2,1 em RGB (**Figura 5.1**) destaca solos com forte influência de oxidação em cor marrom, desenvolvidos geralmente as partir de xistos originados de basaltos e gabros. Observa-se também destaque para algumas estradas, caminhos e picadas em litologias com menor quantidade de quartzo, como os andesitos e metassedimentos indiferenciados. Esta composição destaca em verde escuro porções onde a vegetação é expressiva, geralmente de médio porte, sendo possível a distinção entre plantações de sisal, pastagens de pequeno, médio e maior porte e também vegetação típica de caatinga. Esta última impede a extração de qualquer informação espectral do solo, devendo-se

ater a picadas, estradas, clareiras ou drenagens abertas para observação da resposta espectral relativa ao solo superficial. As plantações de sisal muitas vezes acompanham os terrenos oriundos dos metabasaltos, provavelmente por apresentarem solos mais férteis, apropriados a esta cultura. Também são observadas grandes plantações dessa cultura sobre terrenos originados em rochas de composição intermediária, como meta-andesitos e metaconglomerados de origem intermediária a básica. Nestas plantações é possível avaliar a informação espectral através da exposição de solos residuais em caminhos, estradas e cortes, nas plantações e ao seu redor. As pastagens, geralmente com tamanho pequeno a médio, não representam problemas para verificação da informação espectral relativa ao solo superficial, que na maioria das vezes mostra-se bem nítida.

A composição com as bandas 6,14,20 em RGB (**Figura 5.2**) destaca as principais vias de acesso, drenagens, limites entre áreas geográficas, sendo muito útil durante campanhas de campo para localização geográfica com base na imagem e anotações de pontos percorridos. Esta composição permite o detalhamento de limites entre áreas, caminhos, trilhas, o que possibilita um bom relacionamento entre o ponto visitado e a imagem utilizada. Esta combinação realça a sílica com a banda 20, minerais portadores do íon hidroxíla com a banda 14 e minerais de ferro com a banda 6. Destaque da cor amarela para unidades ricas em quartzo, devido à baixa emissão deste mineral na banda 20 e alta reflexão nas bandas 14 e 6. Esta diferenciação permite separar unidades ácidas de outras intermediárias ou básicas. O produto de alteração superficial de rochas ácidas é sempre muito rico em termos arenosos à base de quartzo, refletindo diretamente no dado coletado. Nesta área percebeu-se o destaque em amarelo de duas regiões ao norte, ambas dentro da faixa de gnaisses quartzo-feldspáticos do embasamento e, ao sul, de um conjunto indiferenciado de quartzo pórfiro e do Granito Teofilândia. Prado (1997) comenta que discriminou em cor amarelo-alaranjado, rochas metassedimentares ricas em quartzo e meta-pelitos (filossilicatos). Esta mudança de coloração para alaranjado ocorre devido à reflexão que filossilicatos apresentam na banda 14 e emissão moderada na banda 20. As áreas com azul intenso são relativas a regiões onde existe um predomínio de óxidos e hidróxidos de Fe^{+3}. Quando este azul passa para tonalidades mais claras, indica que coexistem minerais de ferro e filossilicatos. Colorações avermelhadas podem indicar a coexistência de quartzo e minerais de ferro, que podem representar rochas gabróicas e/ou dioríticas.

A composição com as bandas 23,17,3 em RGB (**Figura 5.3**) destaca minerais à base de sílica em cor cian, em contraste com rochas mais máficas que apresentam cores tendendo ao vermelho. Agar (1994) menciona que esta composição destaca também minerais carbonáticos,

que neste caso não foi claramente identificado. Esta coloração marrom seria decorrente da alta resposta espectral na banda 23 e moderada nas bandas 3 e 17. Percebe-se ao norte da área, uma sucessão de corpos com diferentes respostas espectrais, com formas alongadas e concordantes com os principais lineamentos observados. Na unidade máfica estes corpos aparecem destacados em cores mais avermelhadas. Esta gradação muda sutilmente quando se passa para o gnaisse e alguns corpos alongados e mais contínuos aparece em cores azuladas, tendendo a verde escuro. Em ambas unidades os corpos encontram-se delineados em amarelo na **Figura 5.3**. Estes corpos mostram que a transição entre a unidade do embasamento e a unidade basal do greenstone não acontece de forma abrupta. O que ocorre são intercalações composicionais em áreas onde com diferentes domínios. Na região sul não são observadas estas intercalações nas imagens processadas

A composição com as bandas 17,8,2 em RGB (**Figura 5.4**) destaca a vegetação de sisal em verde intenso e rochas máficas com cores variando de azul a róseo avermelhado. Regiões ricas em sílica aparecem em cores tendendo ao branco, devido à alta resposta nas três bandas selecionadas. É possível estabelecer nesta composição uma separação entre o domínio do embasamento e da unidade basal metavulcânica, delineado em vermelho, e os pequenos corpos alongados, já anotados na imagem anterior, que ocorrem como intercalações dentro de diferentes domínios. Devido ao contraste espectral entre as mesmas, expressas respectivamente pelas cores branco e magenta, percebe-se nitidamente a faixa de transição entre um domínio e outro. Ao sul também se nota o contraste, sendo possível estabelecer uma linha de contato entre o metabasalto e o Quartzo-Pórfiro de composição dacítica, delineada em amarelo. Rochas ricas em minerais de Fe^{+3}, como a hematita, apresentam cores tendendo ao magenta devido à alta reflexão na banda 17, moderada na banda 8 e baixa na banda 2. Também podem ser discriminados os mesmos corpos alongados observados na figura anterior mas que aqui apresentam cor azul variando de colorações de azul para magenta.

A composição colorida RGB com as bandas termais 20,21,22 (**Figura 5.5**), que foi anteriormente avaliada por Lockett et al. (1993) e Agar (1994), não apresenta resultados significativos em termos de cores em função da alta correlação dos dados termais. Esta falta de cores foi explicada por Soha & Schwartz (1978) como sendo devida à distribuição dos pixels desta combinação próximo ao eixo acromáticos no espaço RGB. Esta composição, que exibe apenas tons de cinza, mostra também algumas distribuições de azul, resultantes da baixa emissão do quartzo nas bandas 20 e 21 e à emissão intensa na banda 22, refletindo positivamente na componente azul da combinação RGB. Esta coloração azulada destaca regiões ao sul, correspondentes ao Quartzo-Pórfiro e ao Granito Teofilândia, e ao norte,

correspondentes a gnaisses quartzo-feldspáticos do embasamento. Outros destaques ocorrem onde geralmente há presença de quartzo detrital e drenagens secas.

Esta composição também destaca em cinza escuro a preto as principais feições estruturais de superfície, que se refletem diretamente nas drenagens presentes. Com esta combinação foi possível extrair o padrão de drenagem da área de estudo (**Figura 5.5.a**), permitindo avaliar a área quanto à distribuição dos diversos lineamentos, que podem representar elementos estruturais como fraturas e/ou falhas (**Figura 5.5.b**).

5.2.2. Composições Coloridas RGB com Diferença de Bandas

Além das composições coloridas RGB, também foram feitas composições onde em cada componente de cor foi utilizada uma imagem resultante da diferença entre duas bandas.

A composição colorida RGB (2-1),(3-2),(6-8) (**Figura 5.6**) destaca a vegetação de grande porte e as plantações de sisal em vermelho intenso, a goetita em magenta, a hematita em azul tendendo ao cian e a limonita e a jarosita em branco. Nesta composição observa-se o Quartzo-Pórfiro e Granito Teofilândia, ao sul da área, em cores azuladas escuras devido a baixa resposta nas componentes R (vermelho) e G (verde) da composição. Destaque para as áreas apresentando cor magenta, possivelmente representando a presença de goetita em faixas com influência de alteração hidrotermal na parte central da imagem destacada entre linhas verdes separada da faixa de predomínio de hematita que ocorre sobre o metagabro (linhas laranja). Nesta composição, a diferença entre as bandas 2 e 1 e entre as bandas 3 e 2 resulta em valores baixos para a hematita e para a goetita, ocasionando colorações com componentes azuladas para representar a presença destes minerais. Prado (1997) comenta que, com esta composição, é possível discriminar metacherts em cor azul (rocha rica em sílica), meta-andesitos em vermelho e metatufos em amarelo.

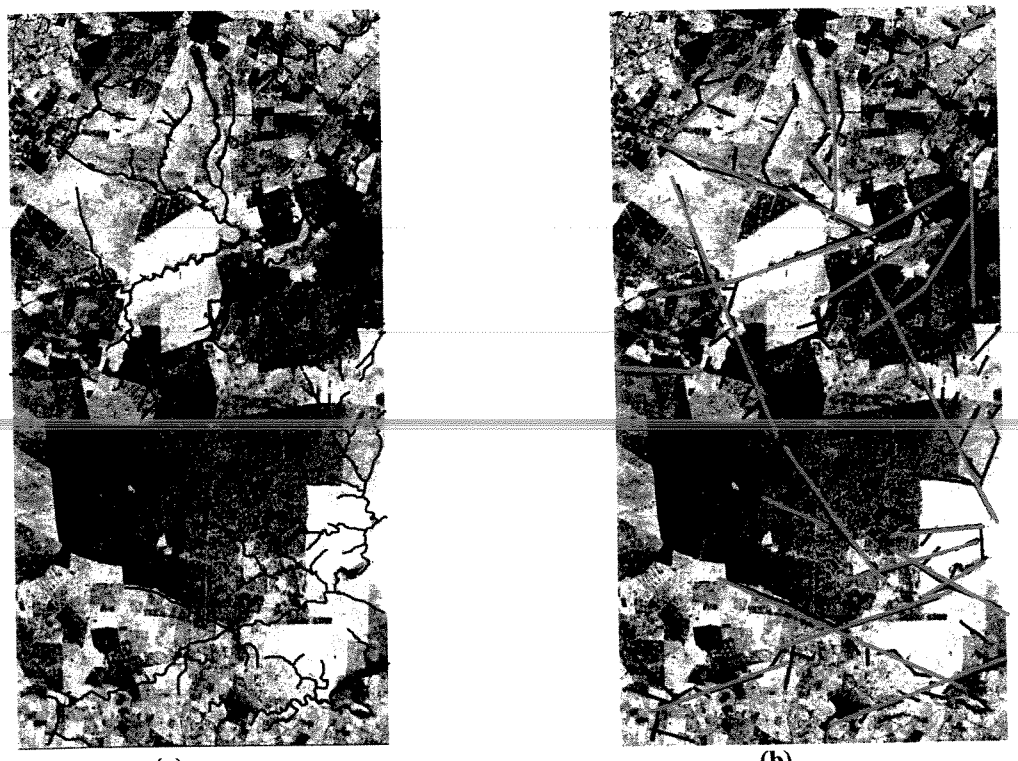
A composição colorida RGB (6-7),(6-8),(6-9) (**Figura 5.7**), segundo Agar (1994), discrimina rochas com forte influência de óxidos e hidróxidos de Fe^{+3} em cores quase brancas. Isto ocorre uma vez que a diferença entre as bandas acima mencionadas resulta em valores altos para os minerais férricos. Valores altos nas três componentes resultam em cores tendendo ao branco. Destaque especial para regiões anômalas ao sul da áreas (**delineadas em azul**) e outras faixas ao centro-norte (**delineadas em verde**). Existem ainda três anotações ao longo de uma linha NE-SW que correspondem pequenas nuvens (**círculos amarelos**).

Figura 5.1: Composição RGB 3,2,1. Linhas vermelhas indicam porções com maior presença de ferro; amarelo ocre delimitam porções com menos influência de ferro. Nesta combinação o metagabro fica bem destacado tanto ao norte quanto ao sul.

Figura 5.2: Composição RGB 6,14,20. Áreas com sílica superficial em cor amarela (contorno em amarelo); estradas principais em linhas vermelhas e secundárias e limites de propriedade em linhas rosa.

Figura 5.3: Composição RGB 23,17,3 . Separação das rochas supracrustais de unidades adjacentes com linhas em vermelho, corpos alongados em linhas amarelas. Delineado em linhas verde, anomalias que podem ser relacionadas a carbonatos.

Figura 5.4: Composição RGB 17,8,2: Ao norte o metagabro diferenciado das unidades adjacentes com linhas vermelhas; ao sul a diferenciação do Quartzo-Pórfiros de rochas meta-básicas com linha amarela. Percebe-se delineado em linhas azul, alguns corpos alongados destacados na composição.



(a) (b)

Figura 5.5: Composição RGB com bandas 20,21,22. **(a)** Composição com principais drenagens; **(b)** Composição com lineamentos estruturais principais (verde) e secundários (vermelho).

Figura 5.6: Composição colorida RGB com as componentes (2-1), (3-2) e (6-8). Destaque para regiões com cores cian e branco (limonita) e magenta (goethita).

Figura 5.7: Composição RGB (6-7),(6-8),(6-9). Anomalias de óxidos e hidróxidos de ferro em cores claras. Anomalias da porção centro-norte mostradas com linhas verde e anomalias da porção sul mostradas com linhas azuis. Círculos amarelos indicam a presença de pequenas nuvens.

5.2.3. Aplicação da técnica FPCS

A técnica FPCS (*Feature-Oriented Principal Component Selection*) foi aplicada aos dados Geoscan com base nos trabalhos de Crósta et al. (1996), Prado & Crósta (1997) e Prado (op. cit.) que a adaptaram para os dados multiespectrais deste sensor. Dentre as novidades associadas à esta adaptação está a possibilidade de se caracterizar anomalias minerais relacionadas a diferentes minerais argilosos, além de caracterizar melhor as anomalias de carbonatos. Além destes também é possível caracterizar zonas silicificadas e oxidadas. A maior resolução espectral do sensor Geoscan permite a caraterização dessas assembléias minerais em um nível consideravelmente mais detalhado do que o sensor TM do Landsat, para o qual esta técnica havia sido originalmente desenvolvida (Loughlin, 1991).

5.2.3.1. Elaboração de Componentes Minerais

A primeira etapa de atividades foi a confecção de Componentes Minerais (CMs), seguindo-se os padrões pré-estabelecidos por Prado & Crósta (*op. cit.*) e Prado (*op. cit.)* para seleção de quatro diferentes bandas (**Tabela 5.1**). Das combinações propostas, com exceção à sílica, todas foram desenvolvidas sobre a área de estudo e apresentaram bons resultados. Estas CMs elaboradas são para minerais férricos (hematita, limonita, goethita - **Figuras 5.8.a** a **5.8.c**), e para os grupos calcita/clorita/epidoto (**Figura 5.9.a**) e sericita/caolinita (**Figura 5.9.b**). A CM para a sílica (**Figura 5.9.c**), mostrou resultados satisfatórios mas ao mesmo tempo realçou o efeito de ruídos de baixa freqüência que não foram efetivamente removidos durante a filtragem das bandas termais. Durante a operação de análise por principais componentes toda informação não correlacionável (que é o caso dos ruídos) é alocada nas componente de ordem baixa, que freqüentemente é selecionada para a elaboração de CMs.

As matrizes de autovetores para a análise por principais componente dos conjuntos de bandas para os minerais pesquisado, já com valores normalizados para contribuição percentual, encontram-se da **Tabelas 5.2** até a **Tabela 5.7**.

5.2.3.2. Definição de Novas Componentes Minerais

Prado & Crósta (1997) utilizaram dois conjuntos de quatro bandas para a elaboração das CM para 5 minerais. Segundo estes autores, as bandas **1,8,12,18** e **1,8,11,15** são utilizados para a CM dos grupos minerais **Calcita/Clorita/Epidoto** e **Sericita/Caolinita**.

BANDAS SELECIONADAS PARA CONFECÇÃO DE COMPONENTES MINERAIS					
Hematita	Limonita	Goetita	Calcita Clorita Epidoto	Sericita Caolinita	Sílica
1	1	1	1	1	1
6	6	6	8	8	10
7	8	9	12	11	20
12	12	12	18	15	23

Tabela 5.1: Relação de bandas do Geoscan utilizadas para confecção de Componentes Minerais segundo Crósta et al. (1997), Prado (1997) e Prado & Crósta (1997).

Autovetores Bandas 1.6.7.12 (Hematita)				
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	25,90%	19,41%	48,60%	4,26%
Banda 6	24,65%	-20,89%	-4,27%	-51,72%
Banda 7	25,05%	-29,19%	-6,75%	43,27%
Banda 12	24,40%	30,51%	-40,38%	0,74%

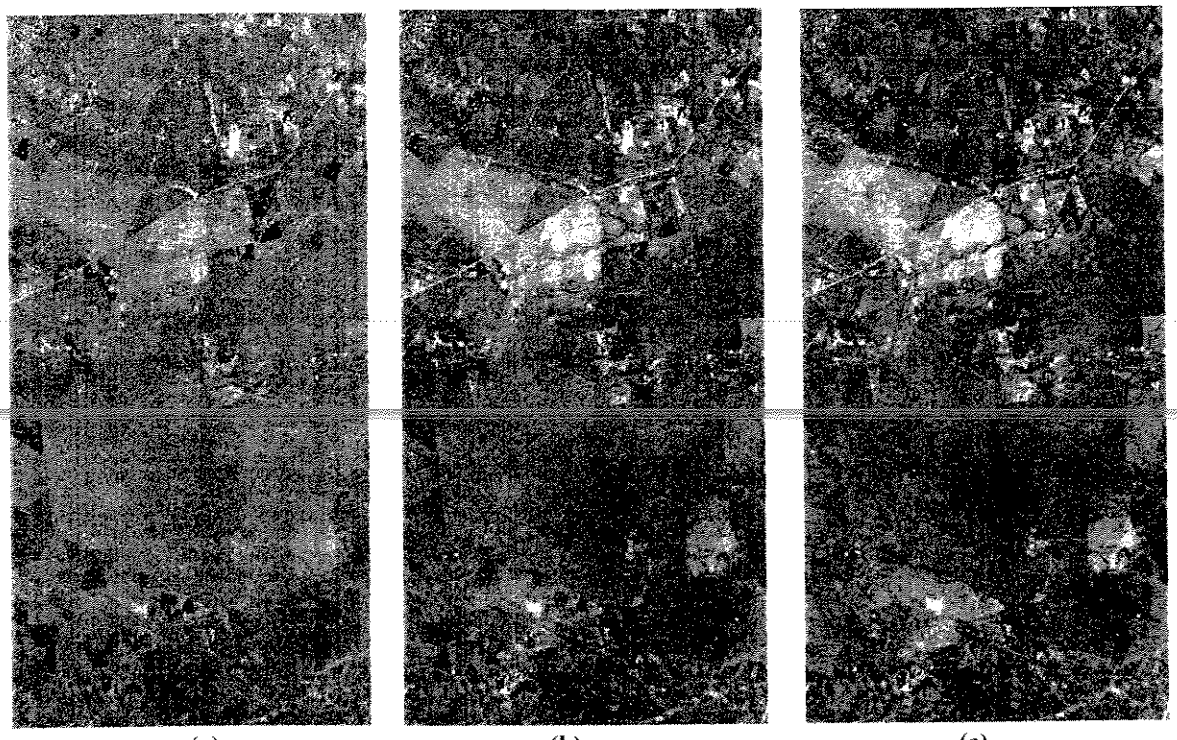
Tabela 5.2: Autovetores das bandas 1, 6, 7 e 12 para a CM da hematita.

Autovetores Bandas 1.6.8.12 (Limonita)				
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	26,05%	19,03%	48,60%	3,54%
Banda 6	24,60%	-21,93%	-4,51%	-50,30%
Banda 8	24,80%	-28,50%	-6,92%	43,75%
Banda 12	24,55%	30,53%	-39,97%	2,40%

Tabela 5.3: Autovetores das bandas 1, 6, 8 e 12 para a CM da limonita.

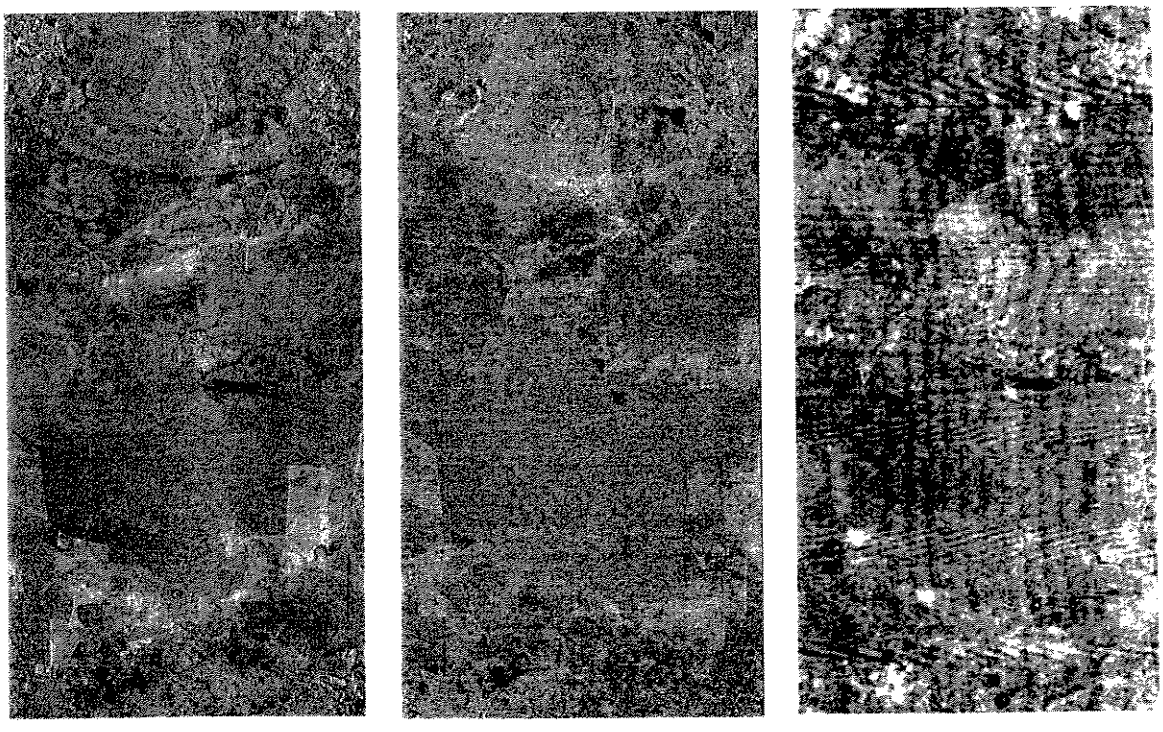
Autovetores Bandas 1.6.9.12 (Goethita)				
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	25,75%	19,26%	49,37%	3,27%
Banda 6	24,25%	-22,21%	-3,89%	-51,43%
Banda 9	25,70%	-27,59%	-7,35%	44,55%
Banda 12	24,30%	30,95%	-39,38%	0,75%

Tabela 5.4: Autovetores das bandas 1, 6, 9 e 12 para a CM da goetita.



(a) (b) (c)

Figura 5.8: CMs respectivamente de (a) para (c), da hematita, limonita e goethita.



(a) (b) (c)

Figura 5.9: CMs respectivamente de (a) para (c), da calcita/clorita/epidoto, sericita/caolinita e sílica.

Autovetores Bandas:1.8.12.18 (calc./epid./clor.)				
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	26,41%	0,44%	-48,22%	-15,33%
Banda 8	21,29%	-55,11%	15,14%	2,49%
Banda 12	26,41%	20,57%	6,06%	47,38%
Banda 18	25,90%	23,87%	30,58%	-34,79%

Tabela 5.5: Autovetores das bandas 1, 8, 12 e 18 para a CM do grupo calcita, clorita e epidoto.

Autovetores Bandas 1.8.11.15 (Caolinita/Sericita)				
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	24,96%	-4,39%	-50,12%	-0,14%
Banda 8	19,40%	-54,14%	16,82%	-0,91%
Banda 11	26,02%	18,73%	15,43%	53,05%
Banda 15	29,61%	22,74%	17,63%	-45,89%

Tabela 5.6: Autovetores das bandas 1, 8, 11 e 15 para a CM do grupo caolinita e sericita.

Autovetores Bandas 1.10.20.23 (Sílica)				
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	26,61%	-27,00%	42,84%	-0,80%
Banda 10	18,66%	-28,01%	-48,09%	-5,09%
Banda 20	28,78%	26,39%	-2,72%	-42,49%
Banda 23	25,95%	18,60%	-6,35%	51,61%

Tabela 5.7: Autovetores das bandas 1, 10, 20 e 23 para a CM da sílica.

Numa tentativa de mapear os minerais de alteração em maior detalhe, foi feita uma avaliação das curvas espectrais dos mesmos em relação às posições das bandas do Geoscan, incluindo também a faixa TIR (**Figura 5.10**), uma vez que Prado & Crósta (1997) utilizaram apenas as bandas termais de número 20 e 23, junto com as bandas 1 e 10 para elaboração da CM para a sílica. Esta avaliação indicou que novas combinações de quatro bandas seriam possíveis para os cinco minerais dos dois grupos em questão.

Desta forma, foram definidos dois novos conjuntos para a **sericita** (**8,11,15,22** e **11,15,19,22**), um para a **clorita** (**13,18,19,22**) e um para o epidoto (**1,8,13,18**) com o reposicionamento da banda 12 para a banda 13 na combinação original (**1,8,12,18**), separando-o da clorita e calcita.

Como foram definidos dois novos conjuntos de bandas para a **sericita** torna-se possível a sua caracterização exclusiva. Com isto, sugere-se que o conjunto **1,8,11,15**, seja usado para a caracterização exclusiva da **caolinita**. Da mesma forma, com a definição de um conjunto de quatro bandas para a **clorita** e a definição de um novo conjunto para o **epidoto** com o reposicionamento da banda 12 para 13, sugere-se também a utilização do conjunto **1,8,12,18** para a caracterização exclusiva da **calcita**.

Estas novas combinações de bandas (**Tabela 5.8**) foram avaliadas através da matriz de autovetores, estabelecendo-se a contribuição normalizada em porcentagem de cada banda do conjunto nas principais componentes e para a determinação da principal componente que contém a informação específica do mineral desejado. Os resultados da estatística para estas novas combinações encontram-se na **Tabela 5.9** a **Tabela 5.14**, e os resultados obtidos para estes novos conjuntos de bandas encontram-se nas **Figura 5.11** e **Figura 5.12**, onde aparecem as CM dos minerais pesquisados.

BANDAS SELECIONADAS PARA CONFECÇÃO DE NOVAS COMPONENTES MINERAIS					
Calcita	Epidoto	Clorita	Caolinita	Sericita (1)	Sericita (2)
1	1	13	1	8	11
8	8	18	8	11	15
12	13	19	11	15	19
18	18	22	15	22	22

Tabela 5.8: Relação das bandas utilizadas para a composição de novas CMs para os minerais acima listados

Autovetores:	Bandas1.8.12.18 (Calcita)			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	26,10%	0,64%	-48,68%	-15,95%
Banda 8	21,34%	-55,31%	14,81%	2,78%
Banda 12	26,41%	20,53%	5,22%	47,25%
Banda 18	26,15%	23,52%	31,29%	-34,02%

Tabela 5.9: Autovetores das bandas 1, 8, 12 e 18 para a CM da calcita.

Autovetores:	Bandas 13.18.19.22 (Clorita)			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 13	29,23%	-23,23%	44,73%	-1,91%
Banda 18	25,05%	-22,73%	-49,00%	-6,24%
Banda 19	24,40%	31,21%	0,20%	-40,67%
Banda 22	21,33%	22,83%	-6,07%	51,18%

Tabela 5.10: Autovetores das bandas 13, 18, 19 e 22 para a CM da clorita.

Autovetores:	Bandas 1.8.13.18 (Epidoto)			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	25,05%	-2,03%	-49,32%	-14,38%
Banda 8	20,26%	-68,67%	15,08%	2,49%
Banda 13	29,39%	2,97%	7,69%	44,17%
Banda 18	25,30%	26,33%	27,91%	-38,96%

Tabela 5.11: Autovetores das bandas 1, 8, 13 e 18 para a CM do epidoto.

Autovetores:	Bandas 1.8.11.15 (Caolinita)			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 1	24,66%	-4,22%	-50,55%	-0,42%
Banda 8	19,50%	-54,37%	16,56%	-0,77%
Banda 11	26,07%	18,72%	15,11%	53,12%
Banda 15	29,76%	22,69%	17,78%	-45,69%

Tabela 5.12: Autovetores das bandas 1, 8, 11 e 15 para a CM da caolinita.

Autovetores:	Bandas 8.11.15.22 (Sericita)			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 8	19,99%	-52,50%	21,32%	0,77%
Banda 11	28,67%	5,57%	-17,92%	-52,55%
Banda 15	32,79%	7,85%	-20,26%	45,92%
Banda 22	18,55%	34,07%	40,51%	-0,77%

Tabela 5.13: Autovetores das bandas 8, 11, 15 e 22 para a CM da sericita.

Autovetores:	Bandas 11.15.19.22 (Sericita)			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Banda 11	25,83%	-21,16%	0,89%	-52,34%
Banda 15	29,72%	-23,44%	2,54%	46,13%
Banda 19	23,76%	31,70%	42,71%	-1,12%
Banda 22	20,69%	23,70%	-53,85%	0,42%

Tabela 5.14: Autovetores das bandas 11, 15, 19 e 22 para a CM da sericita.

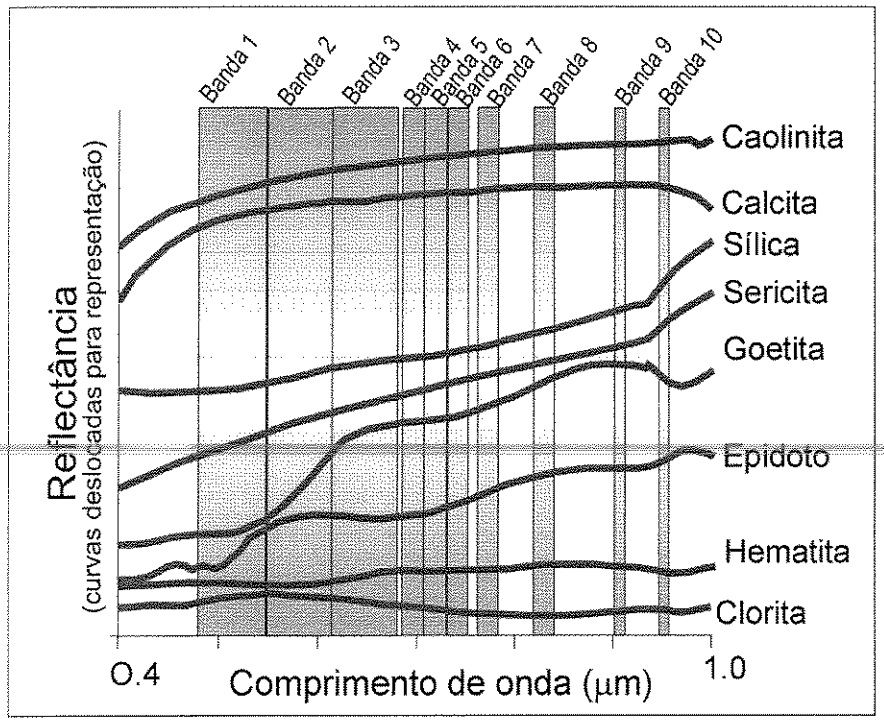
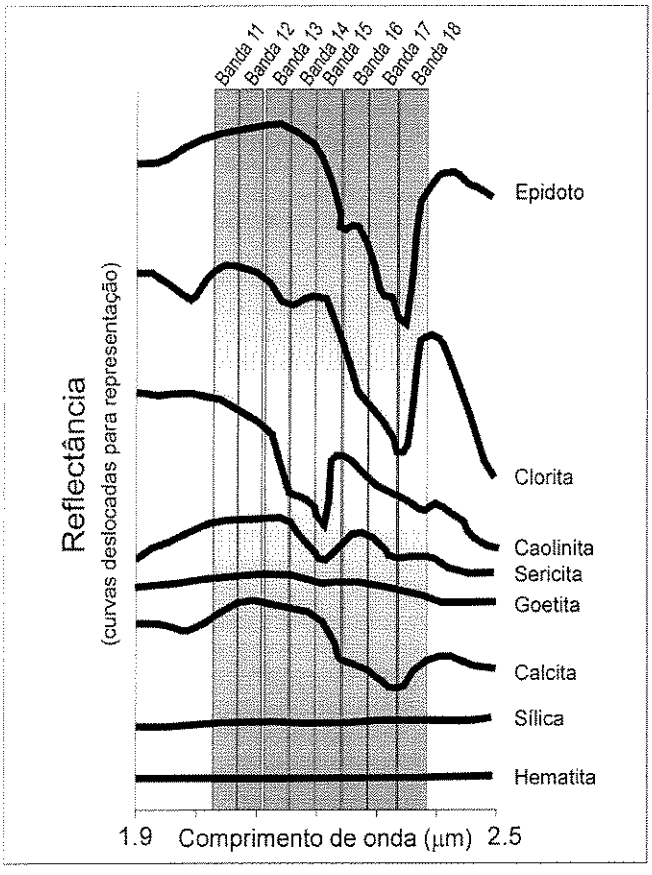
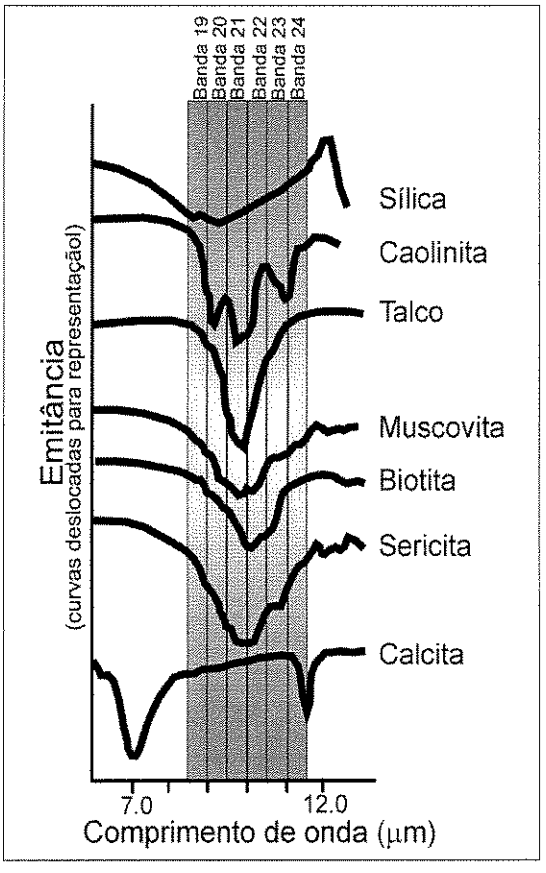
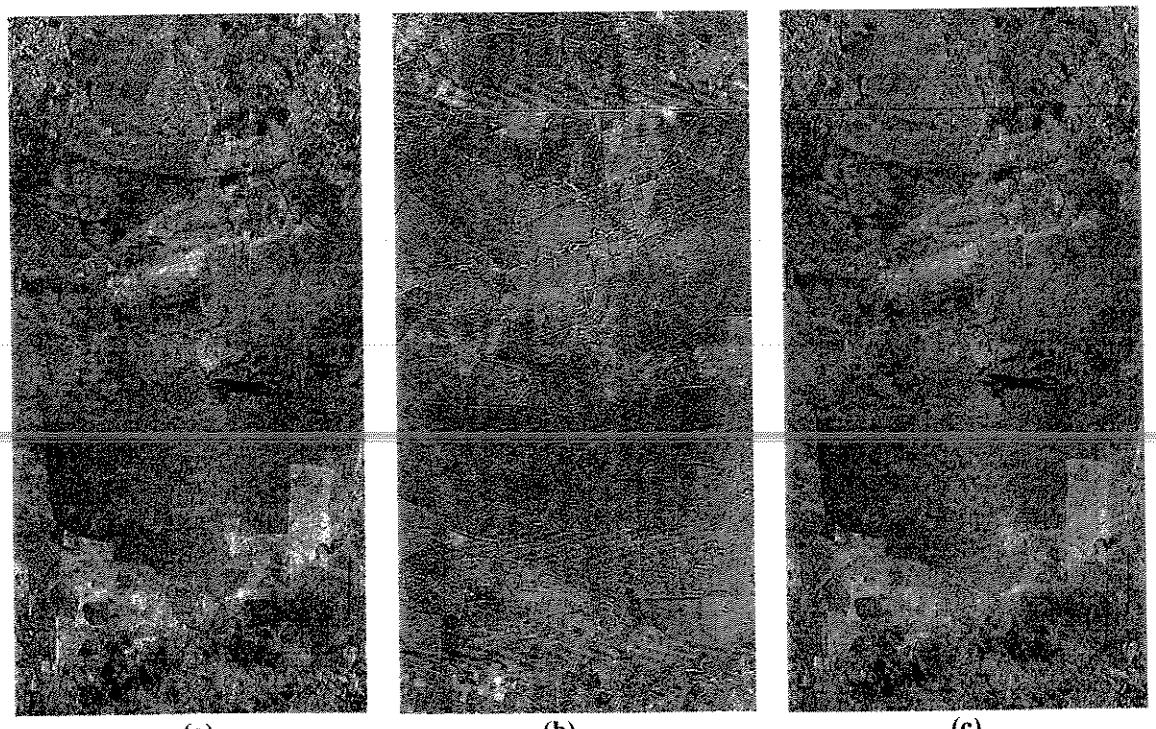


Figura 5.10: Curvas espectrais de alguns minerais pesquisados e posicionamento das bandas do Geoscan nos intervalos correspondentes às Faixas VNIR (ao lado), SWIR (abaixo esquerdo) e TIR (abaixo direito). Fontes: (Aster Spectral Library JPL/NASA; Lockett et al., 1993; Agar, 1994). Curvas deslocadas para representação.

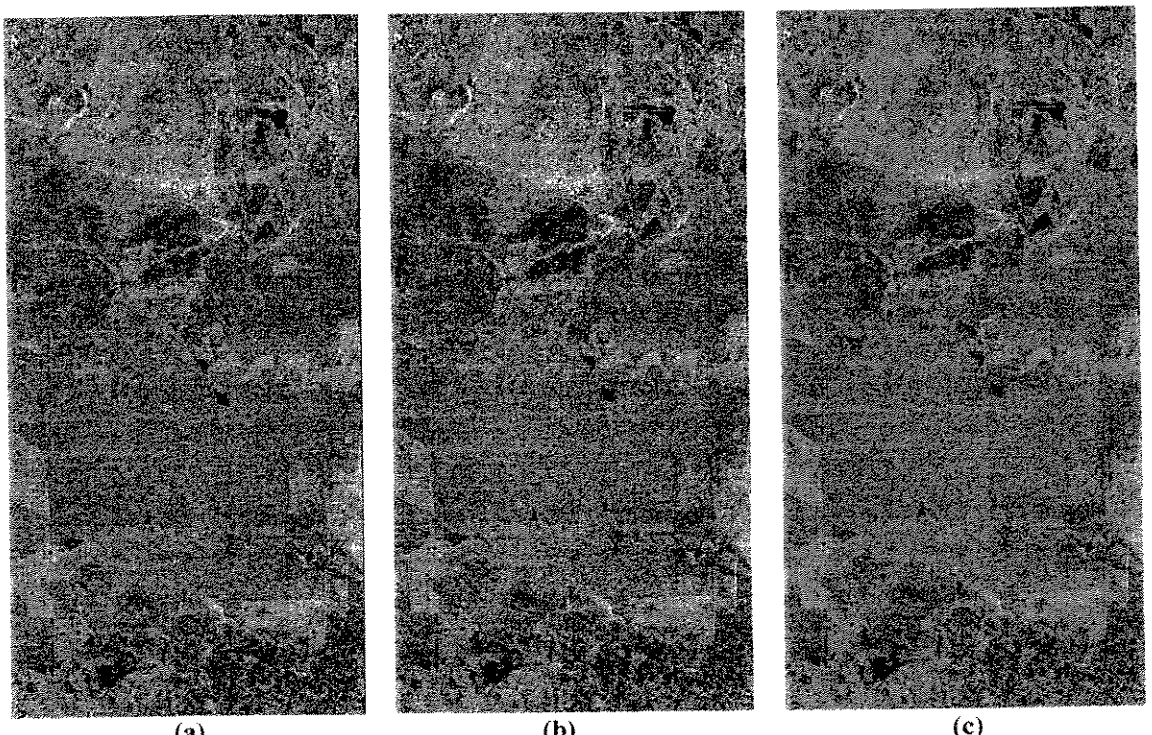






(a) (b) (c)

Figura 5.11: CMs propostas para os minerais calcita (1/8/12/18), clorita (13/18/19/22) e epidoto (1/8/13/18) respectivamente de (a) para (c).



(a) (b) (c)

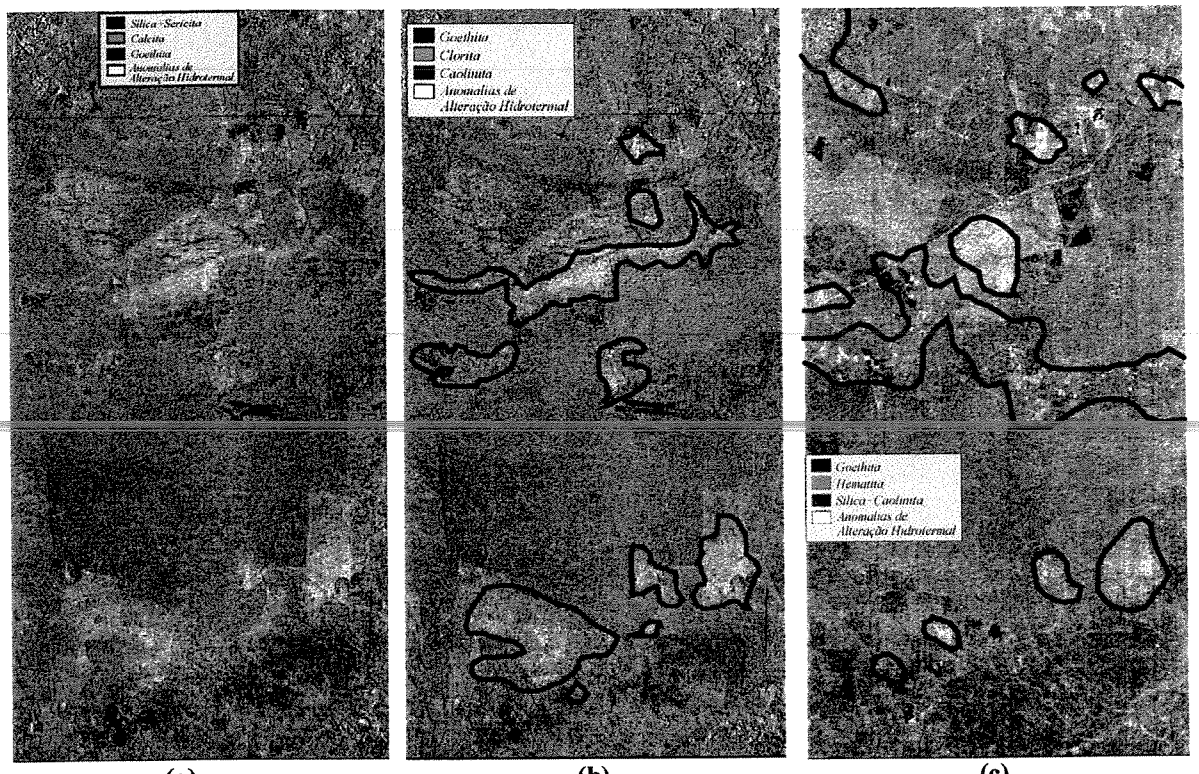
Figura 5.12: CMs propostas para os minerais da caolinita (1/8/11/15), sericita 1 (8/11/15/22) e sericita 2 (11/15/19/22) respectivamente de (a) para (c).

5.2.3.3. Composições Coloridas com as Componentes Minerais

Para melhorar a representação dos minerais de alteração hidrotermal detectados nas diferentes CM produzidas, foram feitas composições colorida RGB onde cada componente é representada por uma CM diferente, possibilitando reunir e representar informações a respeito de três diferentes minerais simultaneamente. Também foi utilizada nesta pesquisa, uma variação da técnica empregada por Loughlin (1991), Crósta & Rabêlo (1993) e Hernandes (1994) para elaboração de composições coloridas a partir de apenas duas CMs. Esta técnica consiste no empregado da 1ª PC (PC1) de duas CMs em uma das componentes RGB (ex.: hematita+goetita = PC1 das CMs), enquanto que nas outras duas componentes são utilizadas as próprias CMs. A variação empregada foi feita com a utilização da PC1 de duas CMs em uma das componentes de uma composição colorida RGB, enquanto que nas outras duas componentes são utilizadas CMs diferentes das primeiras utilizadas na confecção da PC1. Assim é possível utilizar-se quatro diferentes CMs em apenas uma composição RGB.

Das várias combinações testadas, as que apresentaram melhores resultados foram as combinações RGB (sílica+sericita,calcita,goetita), RGB (goetita,clorita,caolinita) e RGB (goetita,hematita,silica+caolinita) que são apresentadas na **Figura 5.13.** Nestas três imagens há destaque para porções em tons claros, indicando alta incidência dos minerais avaliados na composição colorida. Estas são as áreas onde as imagens mostram indicação da ocorrência de alteração hidrotermal, com enriquecimento nos minerais em questão. Estas anomalias encontram-se anotadas em vermelho nas **Figuras 5.13.b e 5.13.c** e estão distribuídas, a grosso modo, em três diferentes faixas, cuja interpretação é abordada em detalhes no item **5.3**.

Fato comum a duas destas três faixas é a ocorrência sobre metagabros (xistos enriquecidos em sericita, sílica e clorita) e a proximidade de grandes drenagens entalhadas na superfície e que apresentam direção aproximada N60E a N70E. Estas drenagens representam faixas onde provavelmente ocorre alta deformação rúptil-dúctil, uma vez que se manifestam como extensos lineamentos bem entalhados, com desenvolvimento associado de um complexo padrão de fraturamento (refletido nas drenagens da área) e que é característico das zonas de cisalhamento do GBRI (Davison et al., 1988). A faixa central, com direção aproximada N80W, não é tão evidente quanto as outras duas, mas sim marcada pela presença de variados pontos com indicações de concentrações de clorita, sílica, goetita, limonita e, em menor proporção, hematita (**Figura 5.11** e **5.12**). Uma quarta região anômala, mas que não tem a forma de faixa, encontra-se no extremo noroeste da cena.



(a) **(b)** **(c)**

Figura 5.13: Composições colorida: RGB das CMs: **(a)** (sílica+sericita,calcita,goetita); **(b)** (goetita,clorita,caolinita); **(c)** (goetita,hematita,silica+caolinita). Destaque para áreas em branco **(a)** e com cores claras e delimitadas em vermelho em **(b)** e **(c)**.

5.2.4. O Realce por Decorrelação

Agar (1994) sugere que zonas ricas em sílica e carbonatos podem ser satisfatoriamente discriminadas utilizando-se as bandas termais do Geoscan em composições coloridas RGB. Para a caracterização dos minerais citados é proposta a utilização destas bandas em composições colorida RGB. Esta composições coloridas podem exibir zonas silicificadas e/ou carbonatadas, muito embora as imagens como um todo possuam tons predominantemente acinzentados devido à alta correlação entre as três bandas em cada uma das composições.

Além da combinação RGB 20,21,22 proposta por Agar (*op. cit.*), foram elaboradas as combinações RGB (**19,20,23** e **24,19,22**) baseadas na avaliação do posicionamento das bandas termais do Geoscan em relação à curva espectral de diferentes minerais. Foi possível verificar que, além da sílica e de carbonatos, a sericita e a clorita também podem ser caracterizadas com o emprego das bandas termais por apresentarem pontos mínimos de emissão termal em intervalos correspondentes às bandas 21 e 22 do Geoscan (**Figura 5.14**).

A combinação 20,21,22 pode, teoricamente, diagnosticar a presença da sílica (banda 20), sericita (bandas 21/22) e clorita (banda 22). Desta forma esta combinação pode ser

utilizada para caracterizar regiões com alteração hidrotermal, onde ocorram conjuntamente estes minerais. Nesta combinação pressupõe-se que a sílica apresente coloração azul, enquanto que a clorita e/ou sericita apresentem coloração variando de magenta para cores mais avermelhadas, devido à baixa emissividade observada nas bandas 21 e 22. A composição RGB 20,21,22 (**Figura 5.15.a**) mostra em azul somente áreas ricas em sílica, distribuídas nas porções norte e sul em algumas faixas menores na região central da cena. A **Figura 5.15.b** apresenta o resultado obtido após o realce por decorrelação, com destaque para as áreas em magenta, que podem indicar a presença de clorita e sericita. Este resultado denota a ocorrência de regiões com visível enriquecimento hidrotermal pervasivo, pois ocorrem indiscriminadamente em diferentes unidades litológicas. Observa-se em linhas verdes, contatos entre unidades litológicas adjacentes com diferenças significativas em relação à presença de sílica. Em pontilhado amarelo encontram-se as faixas onde se percebe feições diagnósticas de silicificação (pixels azuis) e silicificação junto com clorita e/ou sericita (pixels magenta).

A combinação RGB 19,20,23 também foi elaborada para a caracterização da sílica, pois nas bandas 20 e 19 ocorre seu ponto mínimo de emissão termal. Na composição RGB (**Figura 5.16.a**) ocorrem cores azuladas em contraste ao acinzentado. Após o realce por decorrelação (**Figura 5.16.b**) percebe-se a ocorrência de cores diferentes da azulado. Nas regiões sobre unidades geológicas reconhecidamente ácidas, a cor predominante é o azul profundo. Em faixas com possível alteração hidrotermal ocorre tom azul claro, tendendo ao cian ou ao magenta. O contato litológico entre o metagabro do norte e o embasamento encontra-se em linhas vermelhas, faixas com alteração hidrotermal tendendo ao magenta são delimitadas em linha amarela e faixas com alteração hidrotermal tendendo ao cian aparecem delimitadas com linha pontilhada azul.

A combinação das bandas 24,19,22 objetivou a caracterização conjunta de minerais de sílica, clorita/sericita e carbonatos (respectivamente com baixa emissão termal nas bandas 19, 22 e 24). A composição RGB com estas bandas (**Figura 5.17.a**) mostra em vermelho a presença de sílica e em alguns pontos localizados e de pouca expressão, cores tendendo ao magenta. Após o realce por decorrelação (**Figura 5.17.b**) observa-se as cores cian e azul, passando ora para o magenta, ora para o vermelho claro. Mais uma vez a diferenciação entre regiões afetadas pela alteração hidrotermal pôde ser identificada pelo contraste de cores. Esta diferenciação encontra-se anotada com a linha pontilhada amarela, mais uma vez afetando diferentes unidades, indicando assim o caráter pervasivo da alteração.

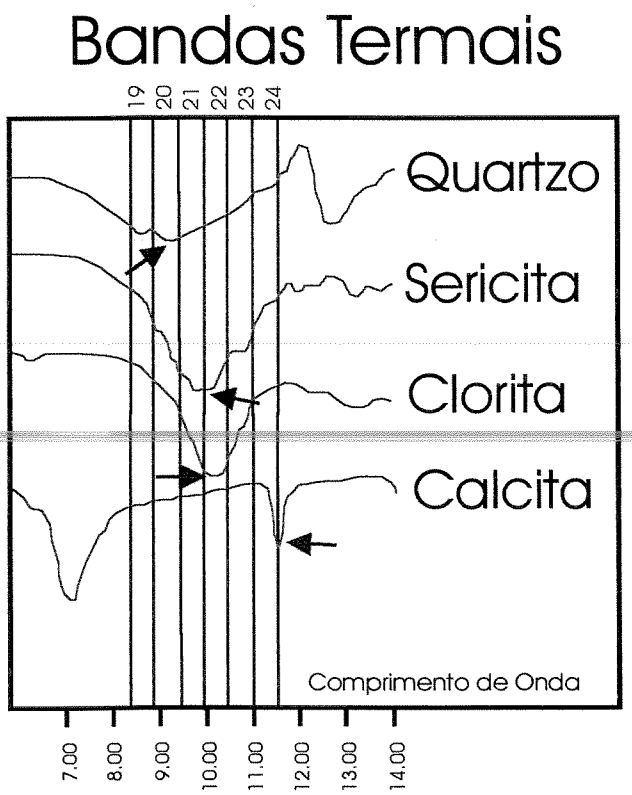


Figura 5.14: Curvas espectrais dos minerais quartzo, clorita, sericita e calcita posicionadas em relação às bandas termais do Geoscan, com destaque para os pontos de mínima emissão termal de cada curva.

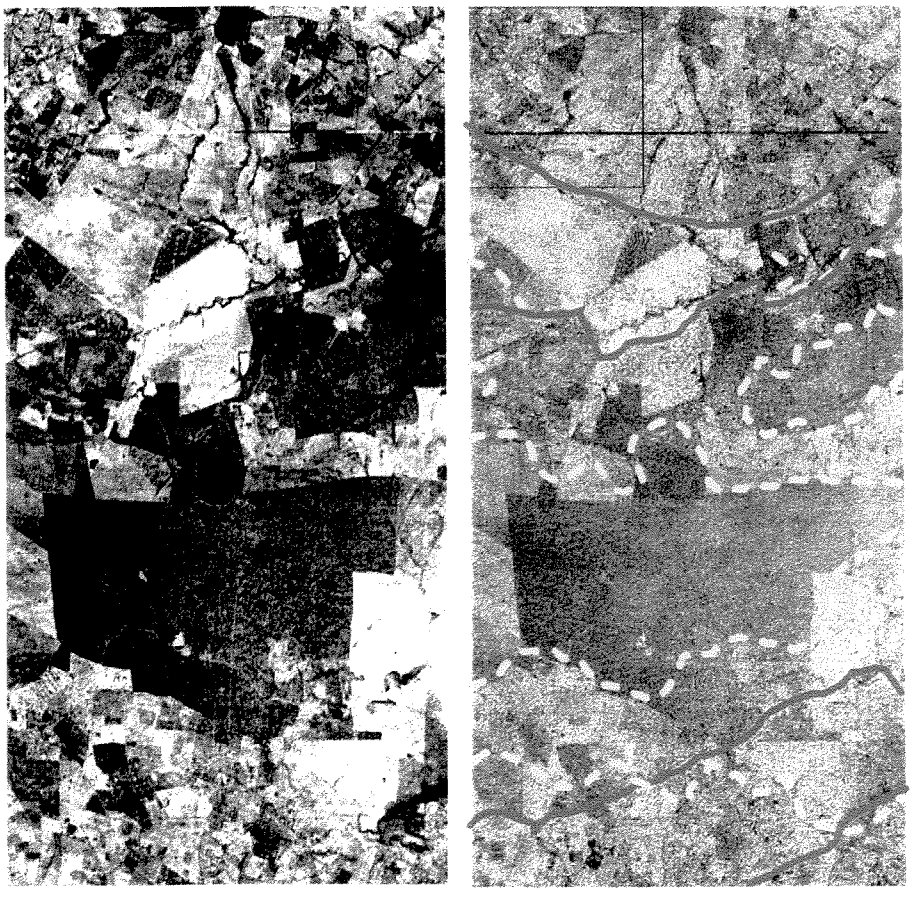


Figura 5.15: **(a)** (esquerda) Composição colorida RGB das bandas 20, 21 e 22; **(b)** (direita) Composição colorida RGB das bandas 20, 21 e 22, após o realce por decorrelação. Notar o significativo realce das cores, com destaque para as anomalias de sílica na região centro-norte. A cor azul indica a presença exclusiva de sílica. O pontilhado amarelo delimita faixas de evidências de alteração hidrotermal com a ocorrência conjunta de clorita e/ou sericita, na cor magenta. As linhas verdes indicam diferenciação litológica com base na resposta espectral da sílica.

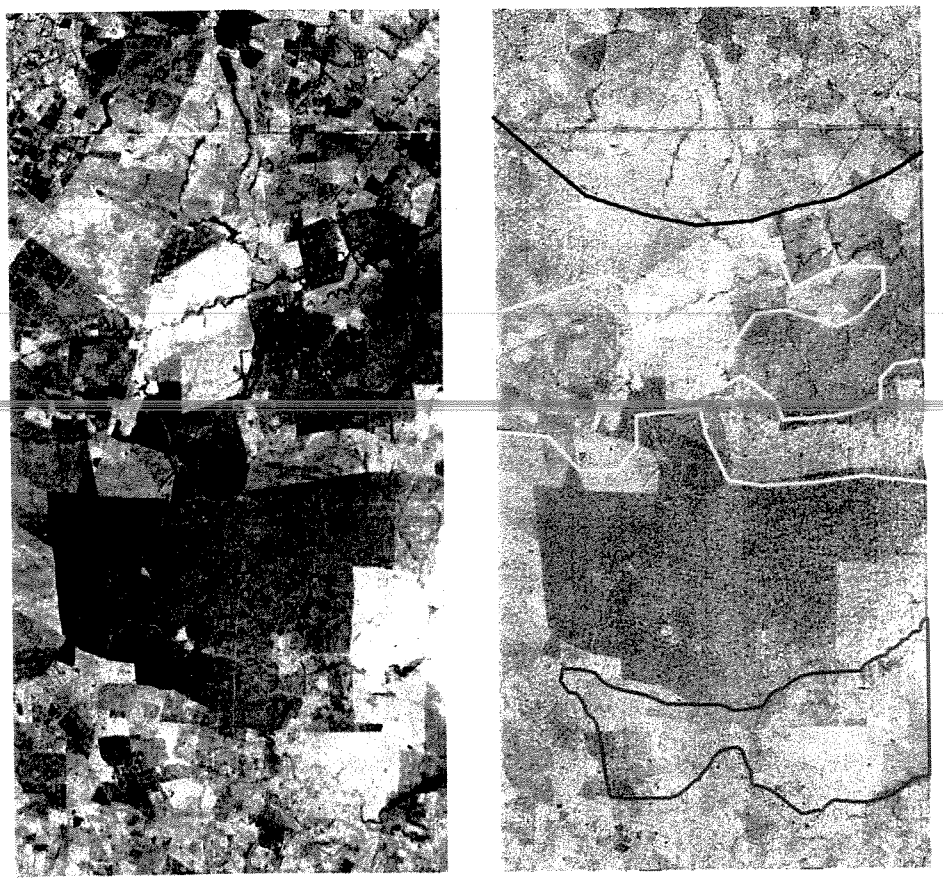


Figura 5.16: **(a)** Composição colorida RGB das bandas 19, 20 e 23 (esquerda); **(b)** Composição colorida RGB das bandas 19, 20 e 23, após realce por decorrelação (direita). Em (**b**) observa-se a separação de rochas do embasamento (linhas vermelhas) com base na resposta em azul claro destas. Observa-se também a delimitação da faixa centro-norte (linhas amarelas) com evidências de alteração hidrotermal e em linha azul alteração hidrotermal pervasiva tendendo ao cian no sul da área.

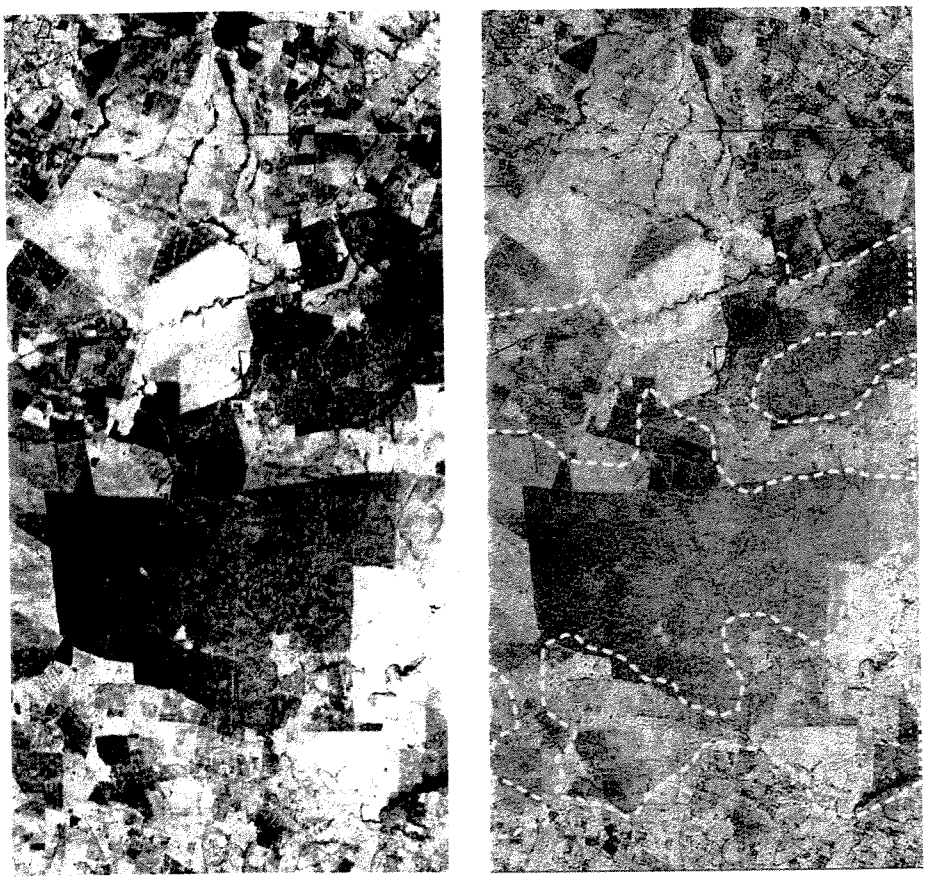


Figura 5.17: **(a)** (esquerda) Composição colorida RGB das bandas 24, 19 e 22; **(b)** Composição colorida RGB das bandas 24, 19 e 22, após realce por decorrelação (direita). Observa-se nesta imagem as cores magenta e cian, respectivamente indicando a presença de sílica e carbonato. Nota-se na faixa centro-norte, algumas áreas com cores alaranjadas, indicando a presença de sericita e/ou clorita. As faixas delimitadas por pontilhado amarelo indicam evidências de alteração hidrotermal.

5.3. Interpretação das Imagens Resultantes

A partir dos resultados obtidos com o processamento digital dos dados Geoscan, foi possível observar a existência de três principais faixas mostrando claras evidências de anomalias minerais associadas a alteração hidrotermal. Estas faixas, devido às características geológicas observadas nas imagens e previstas em modelos de mineralização no GBRI, podem potencialmente hospedar mineralizações auríferas. Em quase todas as imagens as ocorrências auríferas conhecidas de Lagoa do Gato, Lagoa Norte, 244 e Serra Norte aparecem em destaque, com indicação de outras anomalias minerais discretas dentro destas faixas. Elas representam regiões mineralizadas já conhecidas. Das três faixas, duas (**Figura 5.18 – Linhas vermelhas**) apresentam características muito semelhantes como:

(i) proximidade de drenagens de porte grande;
(ii) direção aproximada de N60°E;
(iii) ocorrência sobre metagabros, cuja resposta na composição RGB 3,2,1 (**Figura 5.1**) mostrou solos com forte presença de ferro;
(iv) encontram-se associadas a zonas com bastante fraturamento, evidenciadas nas imagens pelos sistema de drenagens presente.

Estas duas faixas apresentam-se paralelas à direção das drenagem e também ao contato litológico entre as unidades adjacentes, sugerindo haver alguma relação entre a origem destas feições, uma vez que os principais lineamentos referidos a fraturamentos e/ou falhas também estão presentes paralelamente aos contatos litológicos.

A terceira faixa (**Figura 5.18 – linhas verdes**), com direção aproximada de N80W, localizada no centro da área estudada, mostra-se diferente das outras duas em algumas componentes minerais, com reflexos nas composições coloridas. Nelas foram observadas feições de alteração hidrotermal, com oxidação e silicificação intensa das rochas. Esta terceira faixa parece ainda estar inserida dentro de metaconglomerados, nas proximidades de contato litológico com rochas provenientes de meta-andesitos. Não é observada a existência de drenagens e falhamentos associados a esta faixa.

Uma quarta anomalia (**Figura 5.18 – Linhas amarelas**) encontra-se ao norte da área. Diferente do observado nas outras faixas é a sua ocorrência em terrenos quartzo-feldspáticos do embasamento gnáissico-migmatítico. Nelas ocorrem feições anômalas em sílica e em

caolinita que, devido à mineralogia original, são de ocorrência previsível. Ocorrem também algumas anomalias significativas em óxidos de ferro.

Com o desenvolvimento de uma minuciosa inspeção sobre as imagens resultantes do processamento (Composições RGB, Componentes Minerais, Composições RGB com CMs, composições RGB com dados decorrelacionados), pôde-se concluir que estas quatro faixas anômalas representam locais com potencial exploratório para ouro. Esta avaliação, correlacionada com o resultado de um estudo detalhado sobre as principais manifestações associadas à ocorrência de ouro (*metalotectos*) e com uma avaliação do mapa base 1:40.000 (Docegeo, 1996), permitiu que fossem separadas duas faixas anteriormente diferenciadas nas imagens como sendo principais sítios propícios para investigações exploratórias de detalhe.

Estabeleceu-se portanto, que na etapa de campo, os pontos a serem percorridos deveriam, de preferência, se localizar sobres as quatro faixas anotadas na **Figura 5.18.** Destas quatro faixas anômalas, as duas delimitadas por linhas vermelhas nesta figura deveriam ser mais detalhadas que as outras duas delimitadas por linhas verde e amarela, devido principalmente às suas excepcionais características. Alguns pontos fora destas faixas também foram planejados para a coleta de informações para balizar avaliações relativas à área estudada.

5.4. Verificação de Campo

Após a conclusão do processamento digital dos dados Geoscan foi necessária a verificação em campo das anomalias identificadas e apresentadas neste capítulo. As principais atividades desenvolvidas durante a etapa de campo encontram apresentadas no **Apêndice I** ao fim deste volume, com uma descrição mais detalhada destas atividades, bem como sobre as amostras coletadas, análises laboratoriais e aspectos gerais observados no local.

O principal aspecto observado em campo foi a alteração hidrotermal, de caráter pervasivo, que atuou de forma diferenciada sobre todas as rochas supracrustais na área pesquisada. Com maior ou menor grau de alteração, estas rochas apresentam enriquecimento em sílica, seja na forma disseminada ou na forma de veio, originando respectivamente solos ácidos, arenosos e detritais, sejam eles sobre rochas mais ácidas, intermediárias ou mais básicas. Também observa-se por toda área o enriquecimento em sericita e em clorita, em maior ou menor expressão, mas sempre presente.

Ficou claro que os maiores enriquecimentos nestes três minerais acima citados ocorrem nas proximidades das grandes faixas de cisalhamento, que cortam a área pesquisada na direção aproximada N70E. São nestas faixas que ocorrem os maiores desníveis topográficos e onde se instalaram as drenagens mais potentes evidenciando uma relação direta entre estes fatos.

As outras anomalias espectrais observadas nas imagens já não ocorrem tão bem distribuidas pela área, sendo mais comum a presença nas faixas delimitadas na **Figura 5.18**. O enriquecimento em minerais férricos, por sua vez, mostraouse no geral, ser restrito às faixas anômalas apresentadas na **Figura 5.8,** e geralmente originados a partir da alteração do metagabro presente na porção basal das rochas supracrustais deste *greenstone.* Ainda em relação a estes minerais férricos, é comum observá-los em níveis lateríticos com bastante hematita e limonita associadas a quartzo.

5.5. Discussão

Os resultados petrográficos mostraram concordância com os resultado obtidos para as imagens, confirmando a presença de alteração hidrotermal nos pontos analisados. Destaque pode ser dado para os resultados da análise química por absorção atômica para amostras do **Grupo 3.ii ,** que, em alguns casos, indicou a presença de ouro acima do limite mínimo de detecção do equipamento utilizado (10 ppm) (**Apêndice I**).

As atividades de campo, apesar de representarem um complemento ao processamento digital de imagens orientado à discriminação de áreas com anomalias espectrais, mostrou-se útil ao possibilitar a determinação da mineralogia e algumas das feições texturais e estruturais encontradas nos pontos visitados, que no geral foram concordantes com a "expectativa" gerada para a área e comentada na discussão do **Capítulo 2.**

Com o cruzamento das informações obtidas com imagens processadas, com a visita e reconhecimento das anomalias em campo e com o levantamento de algumas informações geológicas através das análises laboratoriais, foi possível a elaboração do mapa apresentado na **Figura 5.19**. Nesta figura encontram-se discriminadas as principais faixas portadoras de alteração hidrotermal (linhas amarelas) e os alvos com maior potencial de portarem mineralizações auríferas (linhas vermelhas), além das drenagens e principais lineamentos estruturais.

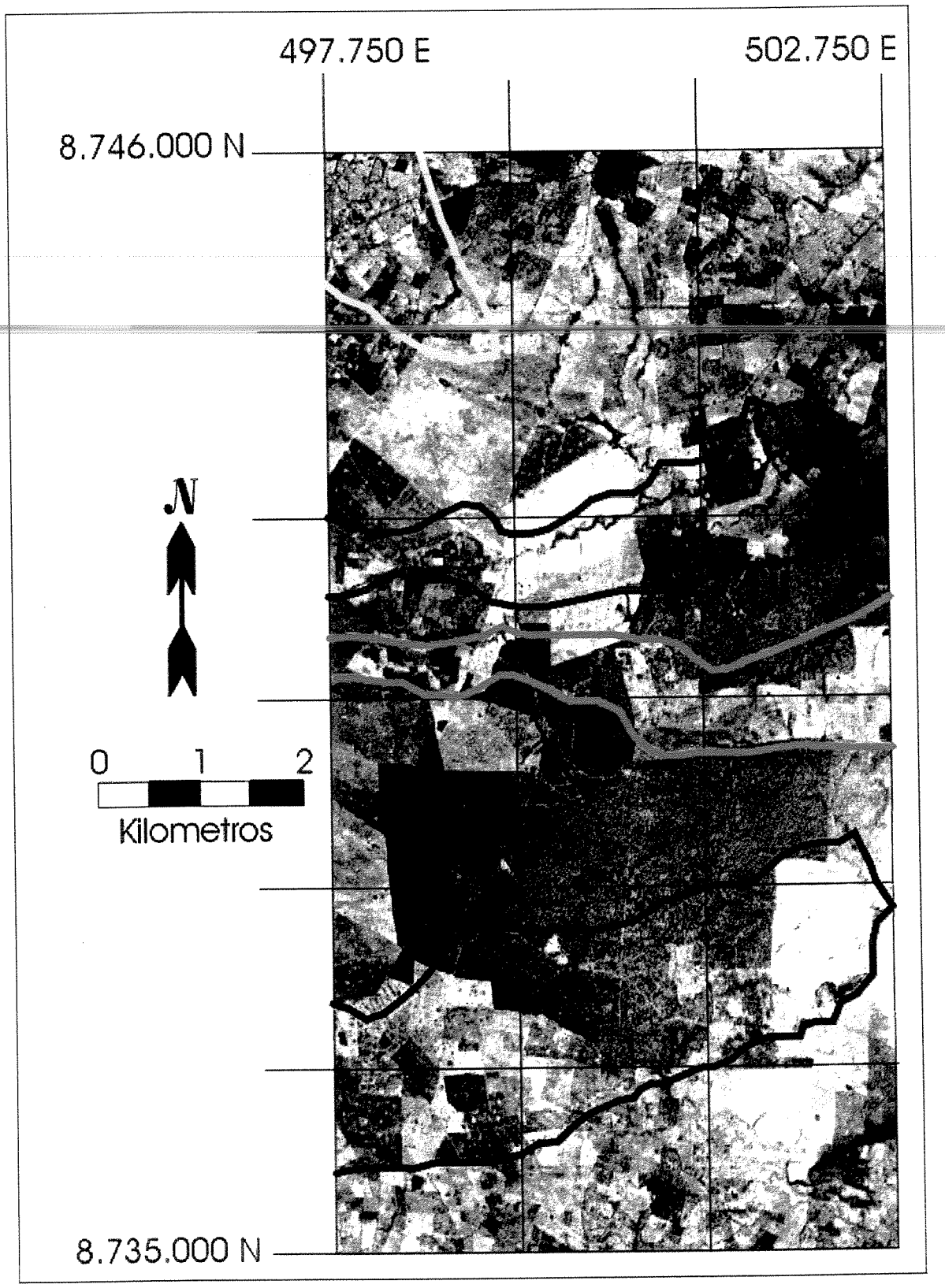


Figura 5.18: Composição RGB com as bandas 20,21,22 com a discriminação das quatro principais faixas anômalas identificadas através do processamento digital das imagens do Geoscan. Em vermelho destacam-se as regiões que reuniram o maior número de anomalias minerais associadas também aos principais lineamentos anotados na região. A faixa verde também apresenta grande reunião de anomalias minerais porém, sem associação a lineamentos. Em amarelo uma porção com somente algumas anomalias minerais.

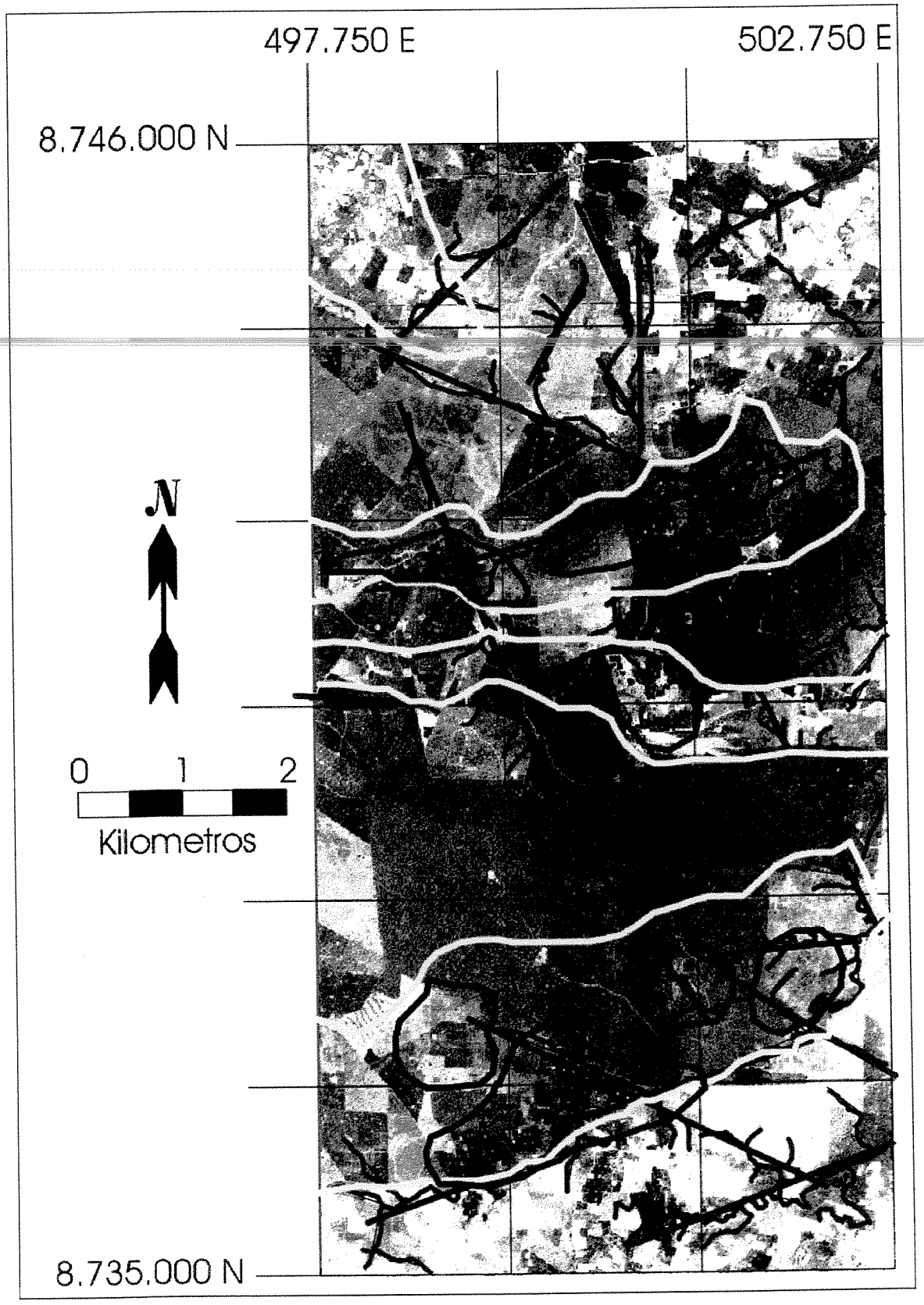


Figura 5.19: Mapa com a composição RGB 3,2,1 de fundo, com os lineamentos e drenagens (linhas azuis) extraídos a partir da composição RGB 20,21,22. Esta figura apresenta ainda indicações de faixas com alteração hidrotermal identificada (linhas amarelas), onde recomenda-se novos de estudos de detalhamento e a delimitação de regiões com anomalias hidrotermais mais evidentes e com grande probabilidade de apresentar mineralizações auríferas associadas (linhas vermelhas).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões a que se chegou neste trabalho foram:

1. A opção pela área de estudo foi feita em razão de sua geologia ser bem conhecida e por haver disponibilidade de informações acerca das mineralizações presentes. Para uma atividade de pesquisa de caráter metodológico como esta, a opção por uma área com tais características mostrou-se acertada, pois possibilitou a comparação entre os resultados obtidos e a verdade terrestre. Pelo fato de ser uma região semi-árida, a vegetação não chegou a ser um obstáculo ao levantamento de informações espectrais da superfície. Apenas sobre grandes plantações de sisal ou áreas de caatinga mais densa não foi possível o levantamento de informações espectrais de toda a superfície, sendo estas extraídas de estradas, caminhos, picadas ou clareiras.
2. O principal obstáculo para a plena utilização do dados Geoscan coletados sobre o GBRI é a presença de ruídos em várias das bandas originais, notadamente nas bandas termais. Utilizando-se técnicas de filtragem convencionais no domínio especiais (filtros de convolução) não foi possível obter resultados satisfatórios na remoção desses ruídos, tendo sido necessário o desenvolvimento de metodologias e de algoritmos computacionais de filtragem no domínio de freqüência, para tratá-los adequadamente. As soluções encontradas, embora voltadas a um fim específico (dados Geoscan), podem ser modificadas e adaptadas para dados de outros sensores e mesmo de outra natureza, como dados aerogeofísicos.
3. As metodologia para remoção do ruído desenvolvida durante a pesquisa teve como principal enfoque a atenuação das freqüências correspondentes aos ruídos, operando-se os dados contidos nos espectros. A definição de uma estratégia foi feita após um estudo sobre a forma, estrutura e comportamento dos ruídos. Estes ruídos mostraram alta correlação interbandas, evidenciada pela análise por principais componentes (APC), através da qual foi possível separar o sinal (concentrado nas PCs de maior ordem), do ruído (concentrado nas PCs de ordem menor). Pelo fato de existir muita correlação dos ruídos, a opção pelo desenvolvimento de rotinas que atendessem simultaneamente o ruído de todas as bandas mas com diferentes parâmetros

(designadas nas rotinas como variáveis de controle) mostrou-se coerente. Até mesmo no caso da banda 24 do Geoscan, a mais afetada por ruídos, houve uma boa recuperação do sinal, possibilitando a sua posterior utilização.

4. As rotinas de filtragem desenvolvidas, denominadas de Filtros Sintonizáveis, representam um aperfeiçoamento das técnicas empregadas para leitura e interpretação dos valores de um espectro e para a confecção da máscara correspondente. Percebe-se que estes filtros, embora semelhantes a filtros existentes no domínio de freqüência, apresentam inovações, criadas para atender o caso específico dos ruídos do Geoscan. Estas rotinas foram geradas na linguagem de macro do ER Mapper. As estruturas lógicas utilizadas no desenvolvimento destes filtros podem ser utilizadas na geração de rotinas escritas em outras linguagens mais poderosas. Também a partir destas estruturas lógicas podem ser feitas adaptações visando outros tipos de dados.
5. A análise dos dados de um espectro Fourier original (sem reescalonamento logarítmico) mostrou-se mais adequada na avaliação da distribuição e do comportamento dos dados através de perfis. Os valores originais distribuem-se geralmente em torno da freqüência 0 (zero), o que facilita a visualização de intervalos correspondentes aos ruídos e a definição dos parâmetros definidos como limiares de freqüência e de intensidade, correspondentes às variáveis de controle nos algoritmos.
6. Em relação às rotinas para filtragem de ruídos, percebeu-se que a operação direta de um espectro Fourier através do Operador Circular Com Atenuante Gradacional traz um ganho no tempo de processamento e na qualidade de resultado. Além disto, o conceito de atenuação gradacional foi adotado a partir de filtros já existentes, adaptados ao filtro Sintonizável Circular e modificados para facilitar sua utilização. A união de filtros gradacionais aos filtros de intensidade para valores de alta freqüência resultaram em uma recuperação da definição das imagens em domínio espacial, representando um avanço em relação aos filtros já existentes.
7. As composições coloridas elaboradas neste trabalho, com bandas puras ou com diferenças entre bandas, resultaram em imagens úteis no reconhecimento dos diferentes tipos litológicos presentes na área de estudo. No caso específico das combinações que destacam o conteúdo em óxidos e hidróxidos de ferro, os resultados obtidos permitiram a delimitação das áreas de ocorrência de meta-gabros.
8. A técnica FPCS, originalmente desenvolvida para caracterização de óxidos e hidróxidos de ferro com dados Landsat, foi adaptada e aplicada a dados Geoscan, possibilitando a identificação de novos minerais de alteração hidrotermal. Neste

trabalho, procurou-se explorar um pouco mais as possibilidades de combinações de quatro bandas na caracterização minerais de alteração hidrotermal, através da produção das "Componentes Minerais" (CMs). A elaboração de novos conjuntos de quatro bandas permitiu definir melhor a ocorrência e distribuição da sericita, caolinita, calcita, clorita e epidoto, que anteriormente eram caracterizados em dois único conjuntos. Com uso das bandas termais após remoção do ruído abriu-se novas possibilidades quanto aos minerais mapeáveis. O grande problema encontrado em relação às bandas termais é que esta técnica tende naturalmente a concentrar o ruído nas últimas PCs, também correspondentes às CMs. Mesmo após efetiva remoção do ruído nas bandas termais originais, um realce do mesmo aparece nas CMs.

9. Das combinações propostas por Crósta & Prado (1997) para a técnica FPCS das bandas Geoscan, os resultados para os minerais de ferro (**Figuras 5.8**) foram bastante significativos, possibilitando a delineação da ocorrência de metagabro ao norte da área de estudo e de áreas ricas em goetita, que é um importante indicador de mineralizações auríferas no GBRI. O resultado para sílica (**Figura 5.9.c**), embora com a presença de ruído, mostrou várias anomalias, em sua maioria confirmadas em campo. Esta combinação é útil quando se pretende caracterizar zonas de alteração hidrotermal enriquecidas em sílica;
10. Das novas combinações propostas e testadas, os melhores resultados foram apresentados pelas CMs da calcita, epidoto e clorita (**Figura 5.10**). No caso da sericita, a utilização de bandas termais em duas diferentes combinações foi eficaz, tendo os resultados mostrando correlação entre si e com o da a caolinita, que antes eram detectados a partir de um mesmo conjunto de quatro bandas.
11. Um novo conjunto para a calcita foi obtido com a utilização de duas bandas termais (23 e 24). Devido à presença de ruído destas duas banda, a CM desse mineral não mostrou bom resultado em função do claro prejuízo da informação espectral. Este conjunto (12,17,23,24) corresponde espectralmente a uma melhor combinação do que a originalmente proposta por Crósta e Prado (1997) (1,8,12,18) para a caraterização deste mineral. Da mesma forma, a caolinita pode também ser caracterizada através da utilização da combinação (19,21,22,24) ou das bandas 19 e 21 junto com bandas de outros intervalos espectrais. Estas combinações são teoricamente melhores para caracterização deste mineral apesar de apresentarem o mesmo problema com ruídos;
12. A técnica de realce por decorrelação foi aplicada com êxito aos dados termais do Geoscan, originando imagens com maior saturação de cores, o que possibilitou a

identificação de anomalias características de enriquecimento nos minerais sílica, clorita e sericita (**Figuras 5.15**, **5.16** e **5.17**). Através do realce por decorrelação foi possível separar a distribuição de anomalias em sílica, que através da técnica FPCS foram prejudicadas devido à presença de ruídos. Através da comparação entre a combinação colorida RGB com as DSs 20,21,22 e a CM da sílica elaborada com as bandas 1,10,20,23 **(Figura 5.9.c)**, foi possível perceber que todas as anomalias anotadas na CM em cores claras aparecem destacadas em azul na respectiva combinação RGB. Isso mostra que há correlação entre os diferentes resultados e possibilita concluir que estas duas técnicas são totalmente válidas quando se pretender caracterizar anomalias em sílica.

13. As bandas termais do Geoscan, apesar dos problemas com ruídos e alta correlação interbandas, mostraram-se úteis na identificação de determinados alvos geológicos. A principal característica delas é a possibilidade de se caracterizar a presença da sílica. Como um dos principais componente das rochas, torna-se importante a caracterização da sílica através do sensoriamento remoto. Além disto, ficou comprovado que as bandas do TIR podem auxiliar também na caracterização de carbonatos, clorita, sericita, caolinita e outros minerais que apresentam emissividade termal característica no intervalo abrangido pelo Geoscan, sejam através da técnica FPCS ou através do realce por decorrelação.
14. A utilização de bandas termais possibilitou também a caracterização dos principais lineamentos da área, através da combinação RGB (19,20,21) (**Figura 5.5, A.3 e A.4**), denotando sua utilidade em questões que envolvam o levantamento do arcabouço estrutural. Foram extraídos os principais lineamento existentes na área, os quais se mostraram correlacionáveis com as zonas intensamente cisalhadas e com fraturamentos, associados ou não a esse cisalhamento. Trata-se de estruturas que favorecem e condicionam a presença do ouro no GBRI, o que reforça a utilidade da caracterização do padrão de lineamentos da área estudada.
15. Com base nas informações existentes acerca da geologia e das mineralizações, combinadas aos resultados das imagens processadas e complementadas com atividades de verificação de campo, foi possível chegar-se ao mapa apresentado na **Figura 5.19**, que define as faixas com alteração hidrotermal e regiões com alta probabilidade de portar mineralizações auríferas dentro da área de estudo.

Com base nessas conclusões, apresenta-se as seguinte recomendações:

1. Futuros estudos sobre filtragem de ruídos devem ser direcionados para a caracterização dos ruídos, uma vez que um dos grandes problemas encontrados neste trabalho foi relacionar clusters de alta freqüência no espectro Fourier a ruídos em domínio espacial.
2. Linguagens de programação mais poderosas do que a linguagem de macro do ER Mapper, tais como C++, Visual C, Delphi, VBasic e IDL, poderia trazer melhores resultados, uma vez que não existem limitações de uso da memória e de manipulação de dados e valores através de objetos, variáveis complexas e ponteiros, resultando em ganho em velocidade de processamento e da quantidade de dados processados. Além disto é possível a transformação de uma imagem pelo cálculo de Fourier em tempo real possibilitando que os resultados de filtragem sejam acompanhados durante a definição de valores para as variáveis. Atualmente, para cada aplicação do filtro, há necessidade de se efetuar duas operações de transformação até o resultado final sendo há necessário a geração de dois novos arquivos de dados, consumindo tempo e espaço em disco.
3. Pode-se explorar em futuros estudo uma nova opção para tratar ruídos no domínio de freqüência com análises estatísticas e geração de superfícies de tendência de segunda, terceira ou maior ordem e com a geração de dados residuais (que podem corresponder aos ruídos). Os pixels correspondentes aos resíduos podem ser operados, diminuidos ou zerados no espectro original, ocasionando uma filtragem melhor distribuída e limpa.
4. A partir do atenuador gradacional circular podem ser desenvolvidos atenuadores com outros formatos geométricos, tais como elíptico e retangulares, procurando atender casos mais específicos, ou ainda filtros gradacionais que obedeçam a vários intervalos definidos por três ou mais círculos ou outra figura geométrica.
5. Baseado nos resultados obtidos neste trabalho com a técnica FPCS, a mesma deve ser explorada com dados Geoscan e de outros sensores multi ou hiperespectrais, testando-se novas combinações para a caracterização de minerais úteis na prospecção de outros bens econômicos.
6. Os alvos delineados na **Figura 5.19** devem ser explorados em detalhe, em busca de informações que possibilitem a eventual identificação de corpos mineralizados com teor econômico.

APÊNDICE A

ATIVIDADES DE VERIFICAÇÃO DE CAMPO E ANÁLISES COMPLEMENTARES

A.1. Verificação de Campo

As atividades de campo foram conduzidas com o intuito de verificar as feições espectralmente anômalas (possivelmente relacionadas à alteração hidrotermal) identificadas nas imagens apresentadas no **Capítulo 5**. Desta forma, as atividades, como foram separadas, são apresentadas abaixo seguir.

A.1.1. Atividade de Campo

As principais atividades delineadas para o trabalho de campo foram:

- Reconhecer as diversas unidades e estruturas geológicas regionais na área;
- Avaliar a área segundo suas vias de acesso e localidades para o planejamento do traçado a ser percorrido no campo;
- Percorrer pontos, principalmente dentro das faixas anômalas apresentadas no Capítulo 5, para avaliação do solo, rocha e feições de alteração hidrotermal;
- Coletar medidas de GPS em pontos percorridos para o georreferenciamento das informações levantadas;
- Coletar amostras para análises laboratoriais (**item A.2**);
- Descrever aspectos gerais e observações para embasar discussões e trabalhos sobre a área pesquisada.

As atividades de campo foram desenvolvidas durante o período de 12/09/97 a 24/09/97 e distribuídas em:

(a) reconhecimento regional do *greenstone* e das principais vias de acesso; planejamento de caminhamento e seleção alvos a serem visitados (3 dias);

(b) reconhecimento das anomalias observadas nas composições coloridas; coletas de amostras de solo, veios e rochas; coleta de medidas de GPS; levantamento de informações da vegetação; verificação da cor, tipo e dos constituintes do solo (6 dias);

(c) organização e verificação dos dados levantados, pontos visitados e amostras coletadas para detectar e corrigir eventuais lacunas e retorno a campo para complementos (2 dia);

(d) consulta a mapas e relatórios internos da unidade DOCEGEO de Salvador (BA) e organização dos dados para confecção de um novo relatório técnico das atividades de campo (2 dias).

A.1.2. Amostragens

Com o intuito de verificar as anomalias reconhecidas nas imagens processadas, planejou-se a coleta de três diferentes grupos de amostras para análises laboratoriais. Os tipos de amostras coletadas e a finalidade para que foram coletadas encontram-se abaixo listados:

- **Grupo 1**: Amostra de rochas frescas. Estas amostras foram coletadas em pontos representativos da geologia da área para elaboração de estudos petrográficos;
- **Grupo 2**: Amostras de solo e da camada superficial. Estas amostras foram coletadas em áreas abertas, praticamente sem a presença de vegetação, a uma profundidade média de 15 centímetros, prevendo a elaboração de bibliotecas espectrais de materiais do *greenstone*;.
- **Grupo 3**: Amostras de rochas e veios. Estas amostras foram coletadas para a realização de análise química de Au (ppm) por Absorção Atômica. Dois diferentes tipos de amostragens froam feitas: (**i**) amostras de veios com quartzo leitoso e sericita, com coloração branca e "*in situ*"; (**ii**) amostras de rochas hidrotermalizadas e de veios, geralmente escuros, com clorita e óxidos e hidróxidos de ferro.

As amostras do Grupo 1 foram analisadas quanto à presença ou não de evidências que caracterizem alteração hidrotermal. Esta análise visou a correlação dos resultados petrográficos destas amostras com os resultados obtidos com o processamento digital das imagens sintetizados na **Figura 5.18.** As amostras do Grupo 2 não foram avaliadas pelo fato de que o equipamento para análise espectral deste Instituto de Geociências ainda não se encontrava disponível para uso e por falta de apoio logístico para elaboração desta análise em

laboratório externo. As amostras do Grupo 3 foram coletadas seguindo-se duas diferentes sistemáticas e analisadas segundo o teor em Au partes por milhão (ppm) pelo método de absorção atômica, nos laboratórios da unidade Fazenda Brasileiro da Vale do Rio Doce. Os resultados obtidos com as análises laboratoriais, bem como a discussão dos mesmos, serão discutidos melhor no item **A.2**.

A.1.3. Aspectos Gerais

O caminhamento foi planejado com a utilização de imagens RGB das bandas 3,2,1 (**Figuras 5.1**) que possibilita a identificação geográfica através da representação das cores do visível, e 6,14,20 (**Figura 5.2**), que destaca limites de propriedades, estradas e picadas. A interpretação destas imagens permitiu a extração de informações sobre caminhos principais, secundários e propriedades para um formato vetorizado apresentado na **Figura A.1,** que também foi utilizado para o planejamento de caminhamento. A região de estudo encontra-se cortada por uma única estrada não pavimentada de maior porte. Pelo fato de que a área está localizada próximo à rodovia BR-116, são vários os acessos menores em ambos os lados desta. Pela dificuldade de se transitar nesses acessos menores despendeu-se bastante tempo com o caminhamento até se chegar às áreas desejadas. Muitas vezes, os caminhos menores aparecem nítidos nas imagens mas são totalmente intransitáveis.

Várias picadas que também aparecem nas imagens (não traçadas) apresentam rápida reconstituição da vegetação, sendo que muitas vezes também são intransitáveis. A área encontra-se bastante modificada em relação à ocupação humana, com várias propriedades pequenas onde são cultivadas plantações de sisal e são desenvolvidas criações de gado e cabras. Apenas uma grande região com vegetação de caatinga encontra-se ainda em estado nativo, sendo que boa parte dela está cortada por picadas e trilhas, todas de difícil acesso. Os pontos visitados foram principalmente aqueles que se encontravam sobre as faixas anotadas na **Figura 5.18.** Estes pontos, que podem ser observados na **Figura A.2**, foram separados em pontos Norte (**Vermelho**) e pontos Sul (**Azul**).

As drenagens vetorizadas a partir da composição RGB 20,21,22 (**Figura A.3**), encontram-se na maioria das vezes secas ou com pequenos filetes de água. Fato comum nestas drenagens é a presença variados açudes. É comum observar nas proximidades dos leitos de drenagens com água, uma grande deposição de sais diversos, recobrindo parte do material superficial com uma capa branca. Também são observadas muitas exposições de rochas

quando as drenagens estão próximas aos grandes lineamentos, anotados em azul na **Figura A.4** e algumas vezes aos lineamentos menores, anotados em vermelho na mesma figura.

A.2. Análises Complementares

As amostras do Grupo 1 e 3 foram as utilizadas para complementar os resultados obtidos com o processamento digital das imagens do Geoscan coletadas no GBRI. As análises efetuadas nestas amostras visaram avaliar os resultados do processamento digital através da comprovação ou não da ocorrência de anomalias minerais indicadoras de alteração hidrotermal. Foram efetuadas em laboratório, ao todo, duas diferentes análises, petrográfica e química. São descritos a seguir os resultados obtidos.

A.2.1. Análise Petrográfica

Para o desenvolvimento de estudos petrográficos foram utilizadas as amostras do Grupo 1, visando caracterizar a ocorrência de minerais indicadores da influência de alteração hidrotermal em alguns tipos rochosos do greenstone belt do Rio Itapicuru. As amostras analisadas foram coletadas nos pontos anotados em verde na **Figura A.5**, e que representam parte do sub-conjunto Pontos Norte anotados em vermelhos na **Figura A.2**.

Através da análise petrográfica microscópica destas amostras, correlacionadas com resultados de imagens, foi possível a separação de três conjuntos: (i) amostras do embasamento para comparação entre regiões com e sem anomalias espectrais; (ii) amostras de rochas com feições marcantes de alteração hidrotermal e deformação intensa; (iii) ocorrência de opacos e a relação com a ação hidrotermal.

O conjunto (i) (**Fotos A.1 a A.4**) representam, no geral, rochas do embasamento cristalino, que se apresentam quase que totalmente desprovidas de alteração hidrotermal. Nas amostras coletadas nos pontos 20 e 21 (**Fotos A.3** e **A.4**) foram anotadas anomalias espectrais nas imagens mas não foram anotadas feições fortes de alteração hidrotermal. Como diferença entre as amostras das **Fotos A.1** e **A.2** percebeu-se enriquecimento em fluídos ricos em boro, originando aglomerados de turmalinas (**Foto A.4**) e metassomatismo (**Foto A.3**). Porém, nota-se alguma pouca presença de minerais opacos, sendo mais comum a ocorrência de hidróxidos de ferro preenchendo microfraturas rúpteis.

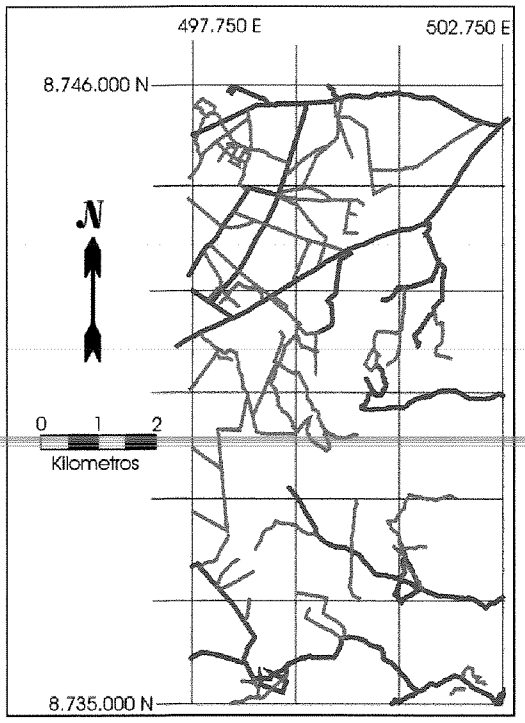


Figura A.1: Mapa local com estradas principais em vermelho, estradas secundárias e limites de propriedade em laranja.

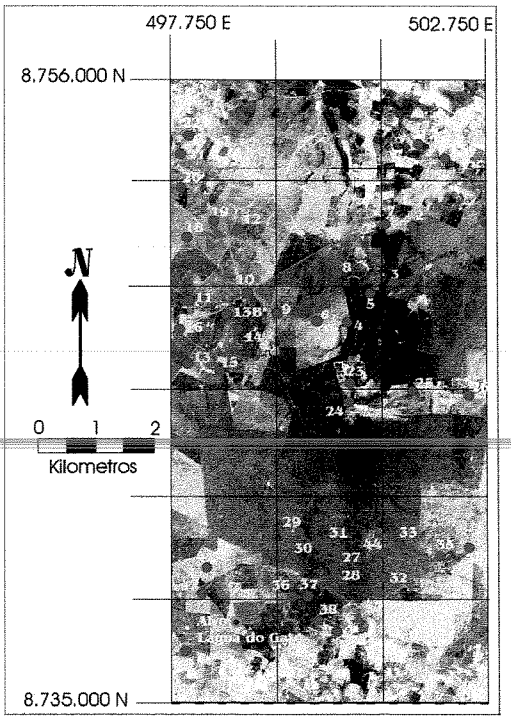


Figura A.2: Mapa de pontos de caminhamento sobre composição RGB 3,2,1. Pontos Norte em vermelho e Pontos Sul em azul.

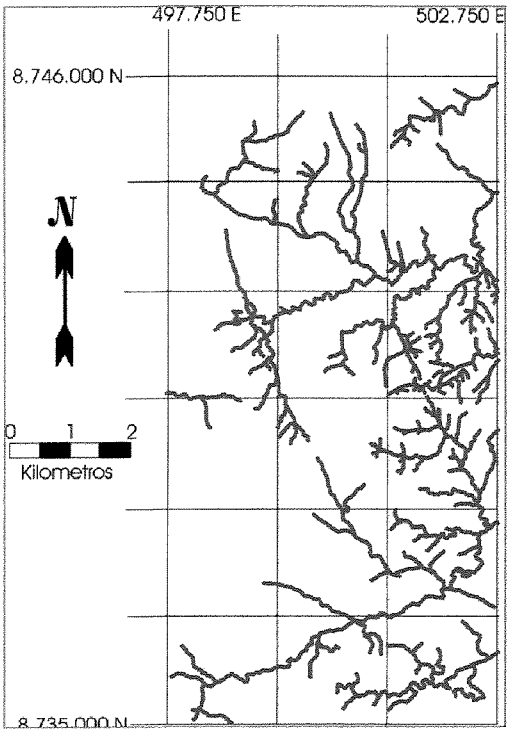


Figura A.3: Mapa de drenagens extraídas da composição RGB das bandas termais 20, 21 e 22.

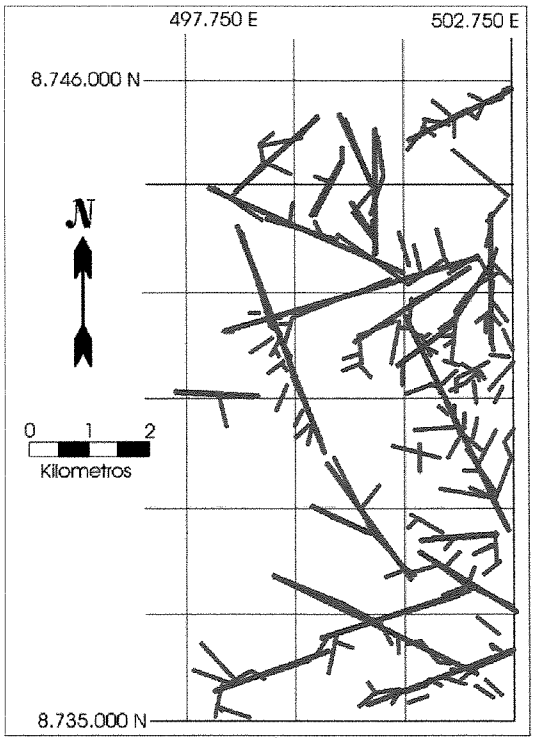


Figura A.4: Mapa de lineamentos extraídos da composição RGB das bandas 20, 21, 22. Os lineamentos principais estão representados em azul e os lineamentos secundários em vermelho.

O conjunto (iii) apresenta destaque para os minerais opacos em rochas com evidências de alteração hidrotermal (**Fotos A.13 a A.15**) e, opaco em uma amostra não apresentou claras evidências de alteração hidrotermal (**Foto A.16**). De uma forma geral, o enriquecimento em minerais opacos ocorre nos intestícios da xistosidade, sendo que muitas vezes há segregação de bandas marcadas por trilhas com predomínio de opacos intervalados a bandas de outros minerais como a sericita, a clorita, o quartzo e outros em menores proporções. Nota-se que, quanto mais próximo aos falhamentos, aumenta-se a proporção de opacos porfiroblástos na rocha. Algumas vezes a ocorrência de alteração hidrotermal não se reflete diretamente na presença de minerais opacos. Em microconglomerados ocorre a presença de opacos (piritas e hematitas) em quantidades, provenientes de rochas pretéritas (**Ponto 4**), geralmente em cristais euhédricos a subhédricos, grandes e bem distribuídos nos clastos e também na matriz.

A.2.2. Análise Química

As amostras do **Grupo 3** (todos os pontos da **Figura A.5**) foram analisadas por absorção atômica quanto ao teor de Au em ppm, nas dependências da Mina de Fazenda Brasileiro, com apoio e supervisão da DOCEGEO. Foram adotadas duas diferentes sistemáticas para coletas de amostras objetivando-se a análise química. Cada uma das sistemática utilizada foi empregada respectivamente em amostras dos pontos em vermelho e em azul da **Figura A.2**.

Os resultados analíticos das amostras para o **Grupo (3.i)** do Norte (vermelho) foram negativos, apontando somente uma única indicação correspondente ao ponto **13B** da **Figura A.2**. O resultado obtidos para a análise das amostras do **Grupo (3.ii)** do Sul (azul), por sua vez, mostraram várias indicações da presença de ouro com concentrações acima do limite mínimo de detecção (10 ppm.) e que se encontram apresentadas na **Tabela A.1**. Estas indicações foram obtidas sobre a faixa Sul, caracterizada em vermelho na **Figura 5.18** como sendo de alta probabilidade de ocorrer alteração hidrotermal. A distribuição das amostras do **Grupo (3.ii)**, que indicaram presença de ouro, pode ser visualizada na **Figura A.5** nos pontos vermelhos na porção sul.

Desta forma, pode ser dado destaque especial aos resultados da análise química por absorção atômica para amostras do **Grupo 3.ii,** que, em alguns casos, indicou a presença de ouro acima do limite mínimo de detecção do equipamento utilizado (10 ppm). Devido ao fato que as duas faixas vermelhas da **Figura 5.18** amostradas para análise química são semelhantes em vários aspectos e somente os resultados para a faixa do sul indicaram a

presença de ouro, é possível deduzir alternativamente que: (i) a amostragem efetuada nos pontos da faixa norte não fora realizada com o devido critério, mostrando-se a amostragem **3.ii** mais adequada para a detecção do ouro; (ii) a faixa norte não apresenta mineralizações; (iii) os pontos visitados não se localizam sobre os melhores alvos; (iv) que as amostras coletadas não portavam ouro.

Ponto	Teor (ppm)
13B	0.27
33	0.26
35	0.68
37	0.69
41	0.20
42	0.11
43	0.17
44	0.14

Tabela A.1: Relação dos pontos que apresentaram teores em ouro acima do limite de detecção (10 ppm) do equipamento de Absorção Atômica utilizado para a análise.

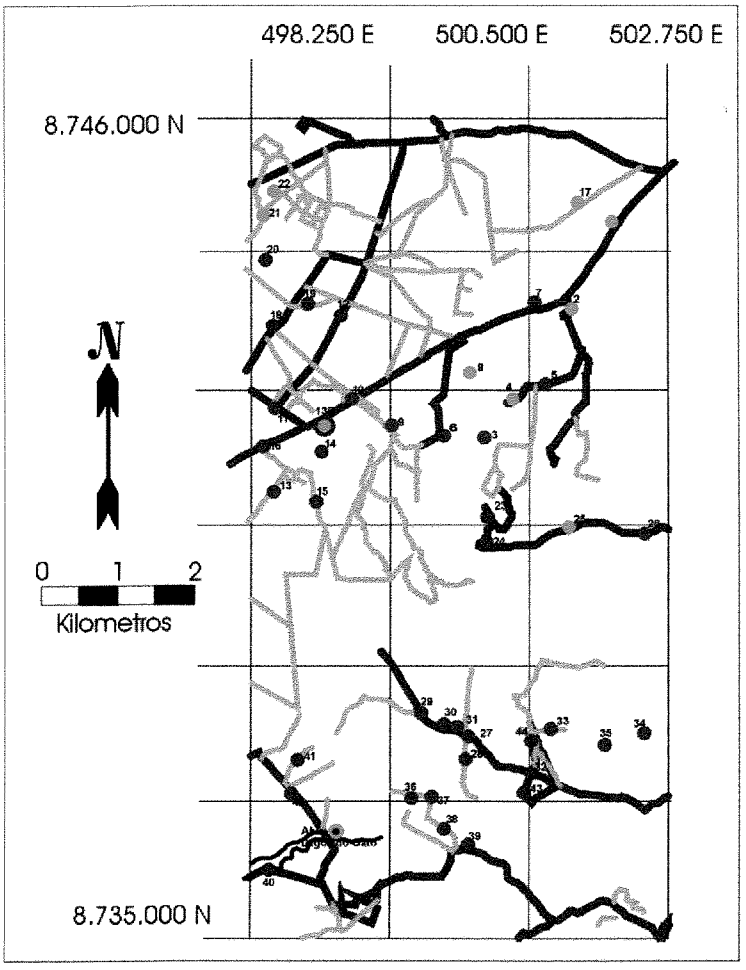
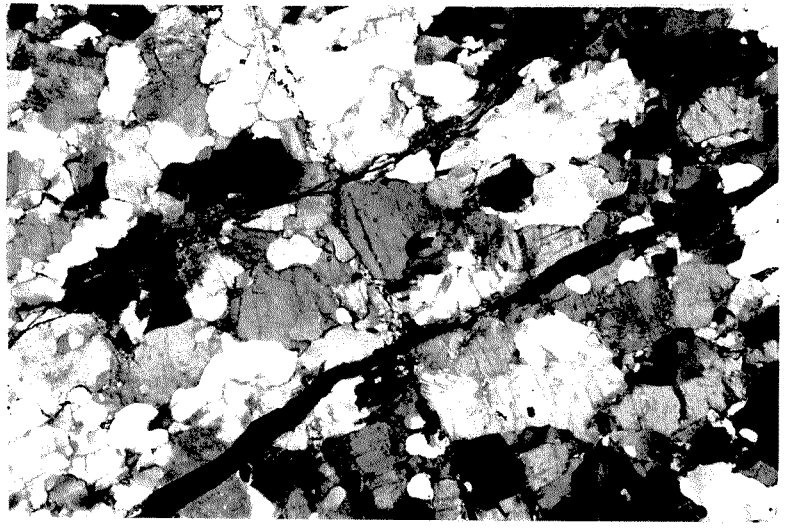
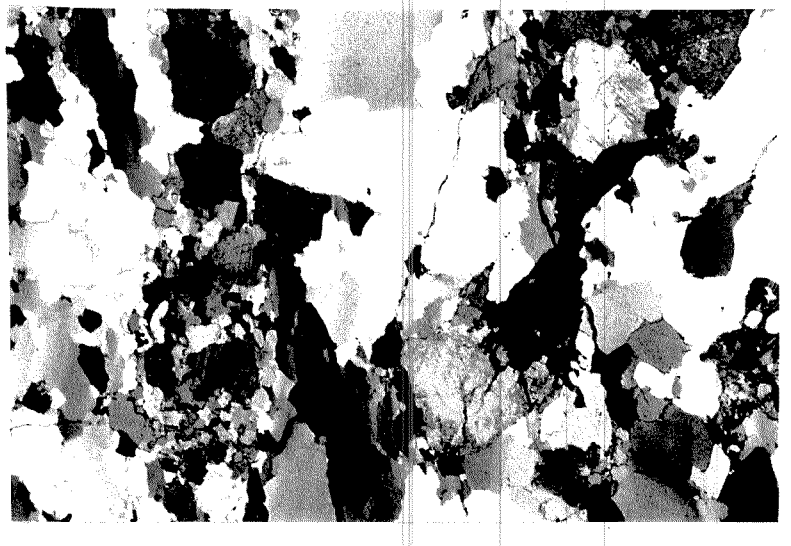
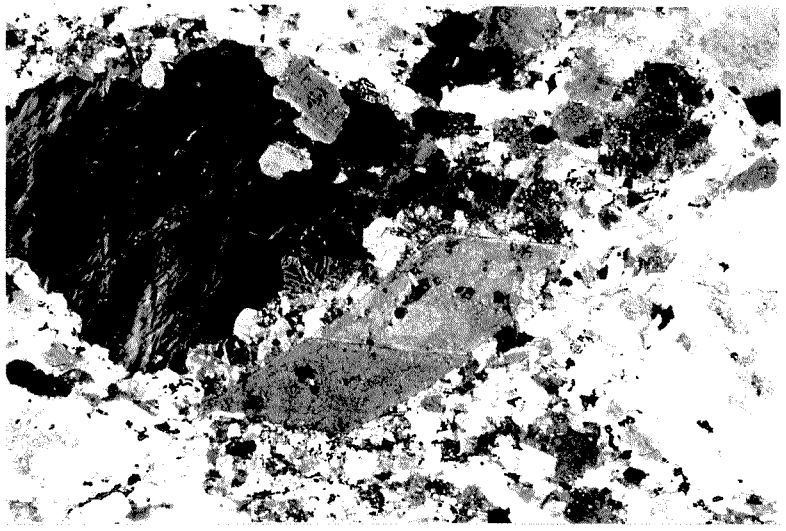
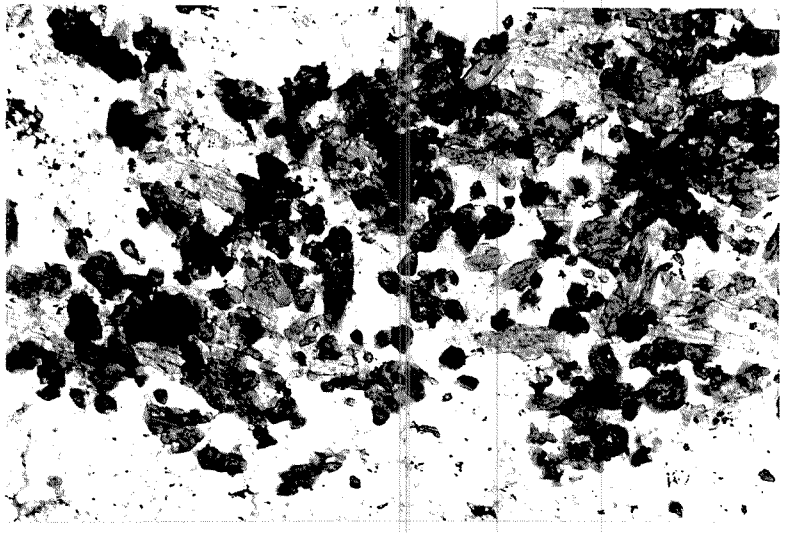


Figura A.5: Mapa com as vias de acesso, limites geográfico e pontos amostrados para petrografia (verdes) e análise química (todos os pontos). Os pontos que apresentaram indicações da presença de ouro acima de 10 ppm encontram-se anotados em vermelho. Destaque para o conhecido alvo chamado Lagoa do Gato de propriedade da Vale do Rio Doce.



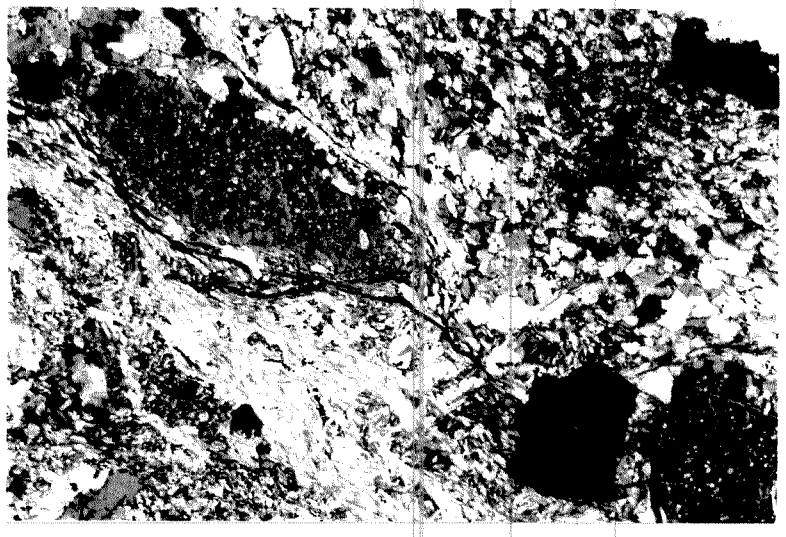


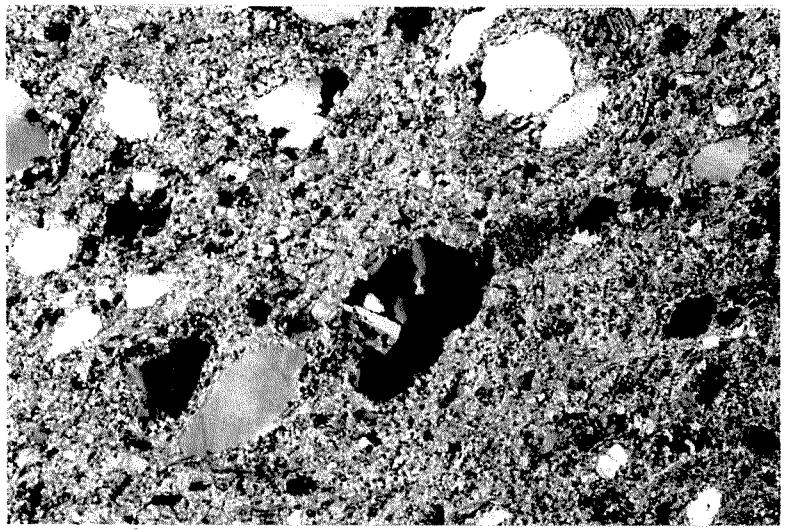


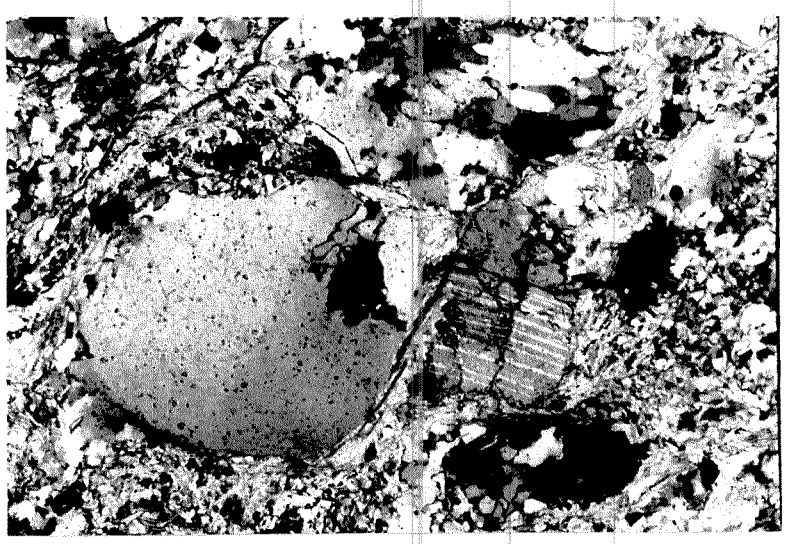


DISPOSIÇÃO / FOTOS: **(1)** Ponto 17 /Obj=2,5/LP/ Rocha com textura granular com quartzo, plagioclásio (An_{12-20}), pouca biotita e clorita, poucas feições rúpteis preenchidas por óxidos e hidróxidos de ferro; **(2)** Ponto 1 /Obj=2,5/LP/ Rocha com textura granular, levemente orientada com quartzo, feldspato (albita e oligoclásio), sericita, clorita e venulações com óxidos e hidróxidos de Fe e carbonatos; **(3)** Ponto 21 /Obj=2,5/LP/ Rocha com textura protomilonítica com fenocristais de feldspato pertítico com quartzo, plagioclásio, mimerquitas e titanita, muito poucas micas e opacos; **(4)** Ponto 20 /Obj=10/LN/ Rocha gnáissica quartzo-feldspática e rica em turmalina indicando ação hidrotermal rica em boro e flúor.

1	2
3	4

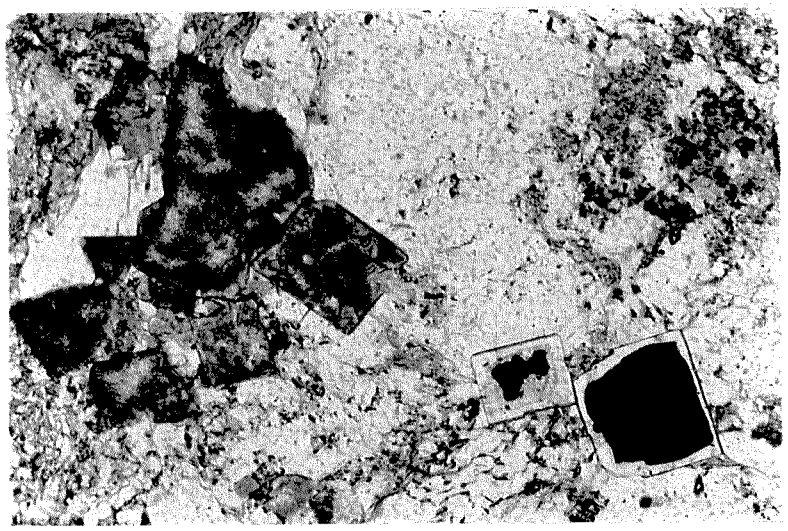


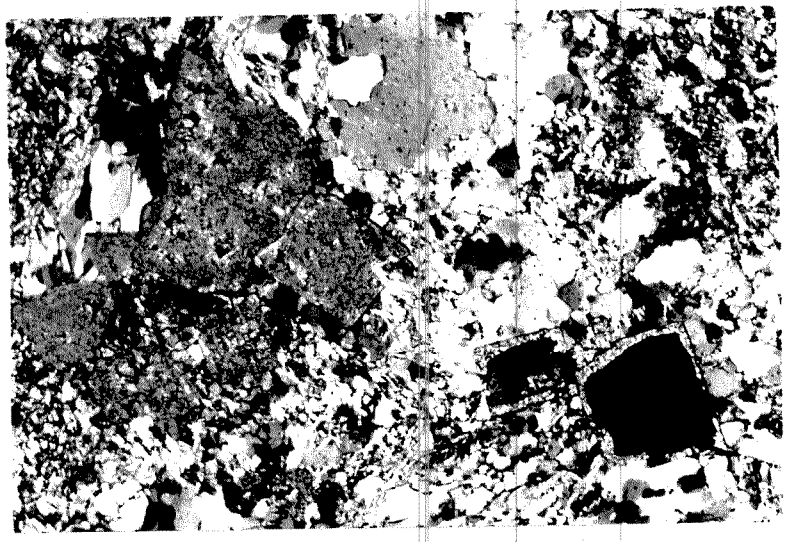


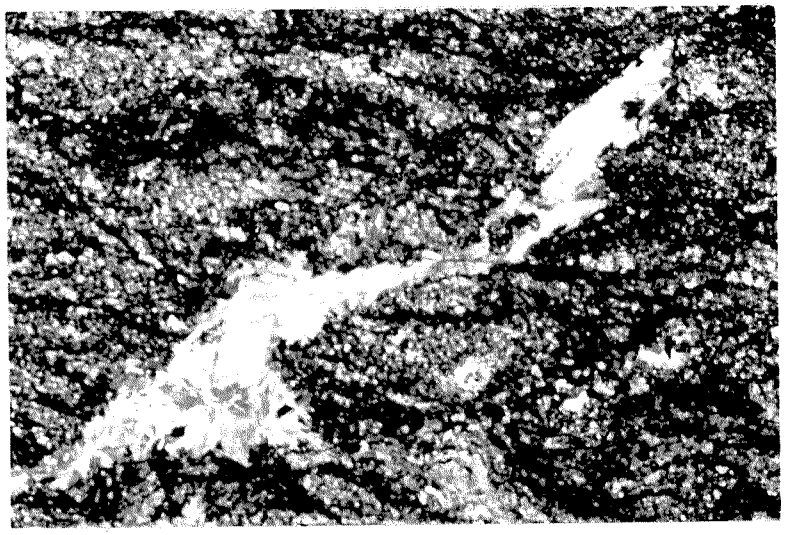


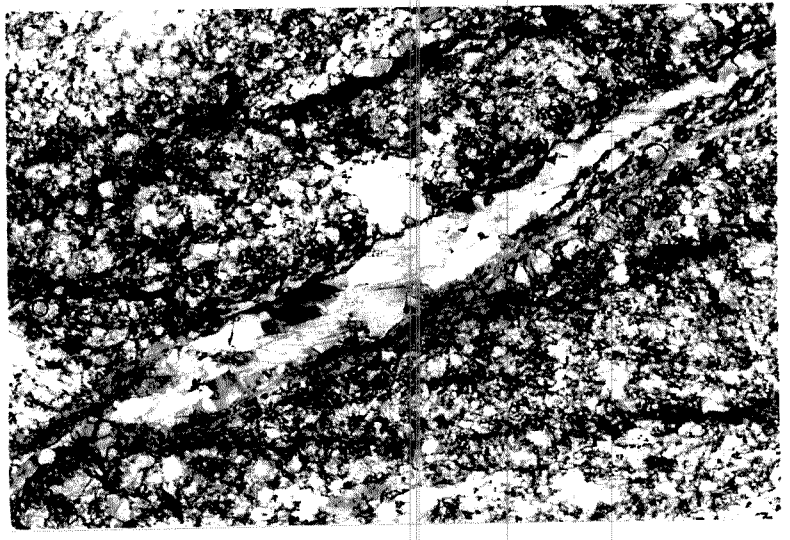
DISPOSIÇÃO / FOTOS: (5) Ponto 8 /Obj=2,5/LN/ Textura milonítica com fenoclastos de feldspato em matriz de clorita, quartzo e sericita onde ocorrem também veios de quartzo, epidoto e carbonatos; (6) Ponto 4 /Obj=10/LP/ Textura protomilonítica com fenoclastos de plagioclásio, saussuritizados, imersos em matriz de sericita, clorita, quartzo, epidoto e poucos carbonatos, destaque para opacos euhedrais. (7) Ponto 25 /Obj=2,5/LP/ Rocha com textura microconglomerática, protomilonítica, composta por clastos de feldspato e quartzo, imersos em matriz de muscovita, sericita, quartzo, opacos e pouca clorita; (8) Ponto 25 /Obj=10/LP/ Igual a rocha anterior, com destaque para clastos de feldspato com comportamento rúptil durante a deformação; mais envidências de enriquecimento em sericita, muscovita, quartzo e clorita.

5	6
7	8



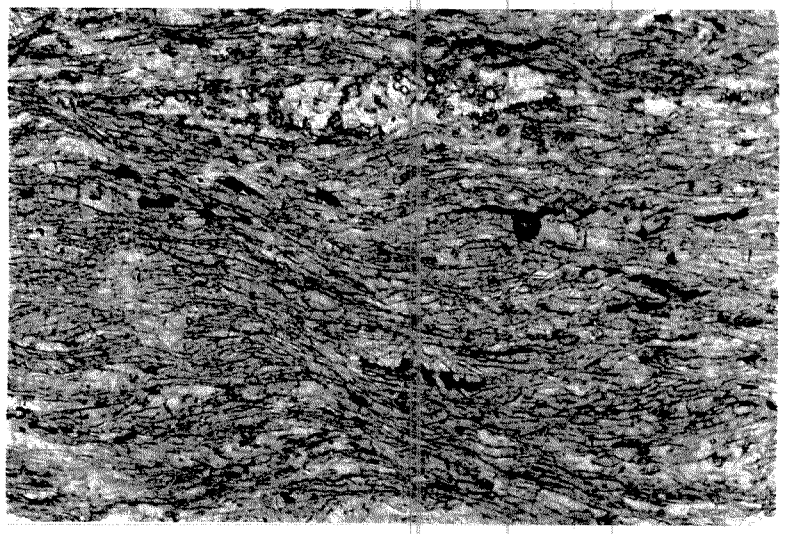


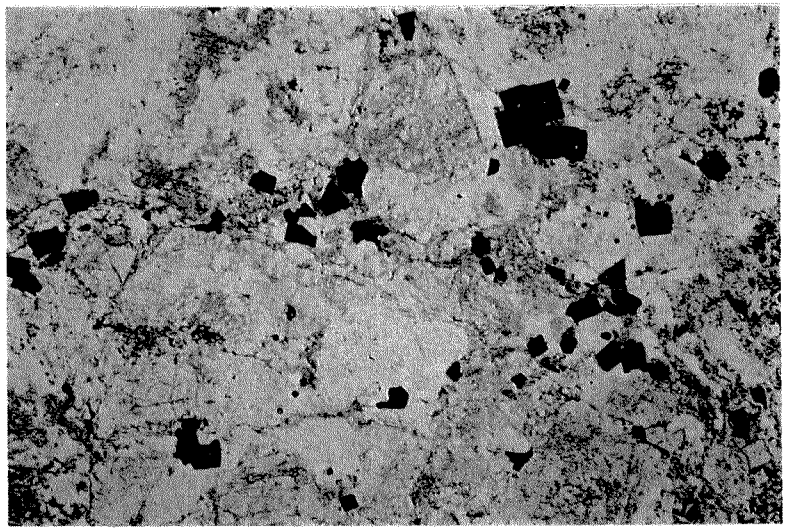


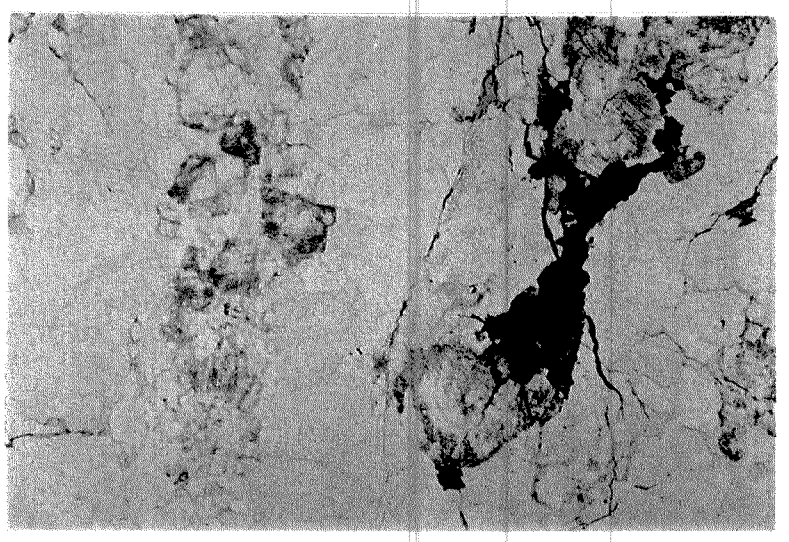


DISPOSIÇÃO / FOTOS: **(9)** Ponto 13B /Obj=10/LN/ Rocha com textura protomilonítica, rica em minerais opacos euhedrais a subhedrais (geralmente pirita), sendo que algumas vezes encontram-se parcial ou totalmente substituídos por clorita; **(10)** Ponto 13B/ Obj=10/LP/ Igual a rocha anterior, composta por quartzo, clorita, sericita e pouco feldspato; destaque para grandes cristais de pirita transformadas em clorita e epidoto; **(11)** Ponto 2/ Obj=2,5/LN/ Rocha com textura milonítica, orientada segundo a foliação, composta por clorita, sericita, quartzo e carbonato, cortada por veios dicordantes de carbonato e quartzo; **(12)** Ponto 2 /Obj=10/LP/ Rocha igual a anterior cortada por veios com quartzo e carbonato envoltos por clorita parcialmente substituidas por óxidos e hidróxidos de ferro.

9	10
11	12







DISPOSIÇÃO / FOTOS: **(13)** Ponto 4 /Obj=2,5/LN/ Detalhe da **Foto 6** com destaque para minerais opacos sob a forma de trilhas paralelas à foliação, perfazendo cerca de 15 a 20% da lâmina estudada; **(14)** Ponto 8 /Obj=10/LN/ Detalhe da **Foto 5**, com shear-bands tipo C, algumas cloritas como mica-fosh e minerais opacos microcristalinos em trilhas paralelas à xistosidade da rocha, perfazendo cerca de 10% da lâmina estudada; **(15)** Ponto 13B /Obj=2,5/LP/ Detalhe da rocha das **Fotos 9** e **10**, com destaque para deformação rúptil em piritas subhédricas fraturadas; estas piritas perfazem cerca de 10% da lâmina estudada; **(16)** Ponto 1 /Obj= 2,5/LN/ Detalhe da **Foto 2**, com destaque para os únicos opacos amorfos enontrados na lâmina (provavelmente hematita) que bordejam feldspatos, e também preenchendo pequenas microfraturas (provavelmente limonita), perfazendo menos de 1% da lâmina estudada.

13	14
15	16

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAR, R. A. 1994. Geoscan Airborne Multi-Spectral Scanner as applied to exploration for Western Australian diamond and gold deposits. In: ERIM TENTH THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGY REMOTE SENSING, San Antonio, Texas, 9-12 may.

ASHLEY, R. P. & ABRAMS, M. J. 1980. Alteration mapping using multispectral images - Cuprite mining district, Esmeralda Country, Nevada. USGS File Report 80-367.

BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U. G. & TORQUATO, J. R. 1980. Evolução geocronológica do Precambriano do estado da Bahia, *Textos Básicos-Ba:* SME/CPM 3, p:l-l0l.

CHAUVET, A.; GUERRA, C.; SILVA, F. C. A. & FAURE, M. 1997a. Géoehronologie $^{207}Pb/^{206}Pb$ et $^{40}Ar/^{39}Ar$ des granites paléoprotérozoíques de la ceinture de roches vertes du Rio Itapicuru (Bahia, Brésil). C. R. Acad. Sei Paris, t.324, série II a, p:293-300.

CHAUVETT, A.; SILVA, F. C. A.; FAURE, M. & GUERROT, C. 1997b. Structural and geochronological constraints on the paleoproterozoic evolution of the Rio Itapicuru greenstone belt (Bahia, Brazil): a combination between archaic (vertical) and moderntype (horizontal) tectonic styles. (no prelo).

CRÓSTA, A. P. & MOORE, J. McM. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in 5W Minas Gerais state, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 7. Calgary, Canada, 1989. *Proceedings. Calgary,* ERIM, v. 2, p:l 173-1187.

CRÓSTA, A. P. & RABÊLLO, A. 1993. Assessing LANDSAT TM for hydrotermal alteration rnapping in central-western Brazil. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 9. Pasadena, California, 1993. *Froceedings. Pasadena,* ERIM, v. 2, p:1053-106[1].

CRÓSTA, A. P.; PRADO, 1. D. M. do; OBARA, M. 1996. The use of Geosean AMSS data for gold exploration in the Rio Itapicuru Greenstone Belt (BA), Brazil. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 11. Las Vegas, Nevada, 1996. *Proceedings. Las Vegas,* ERIM, v. 2, p:205-21[4].

DAVISON, I.; TEIXEIRA, J. B.; SILVA, M. G.; NETO, M. B. R. & MATOS, F. M. V. 1988. The Rio Itapicuru Greenstone Belt, Bahia, Brazil: Structure and stratigraphical outline, *Prec. Res.,* 42, , pp.1-17.

DRURY, S. A. 1987. *Image Interpretation in Geology.* London. Alley&unwin.

ELVLDGE, C. D. AND LYON, R. J. P. 1984. Mapping clay alteration in the Virgínia Range - Comstock Lode, Nevada, with airborne thematic mapper imagery. 3rd THEMATIC CONFERENCE: REMOTE SENSING FOR EXPLORATLON GEOLOGY, Cobrado Springs, CO. ERIM, *Proceedings...,* pp. 161-170.

FIGUEIREDO, M. C. H. 1989. Geochemical evolution of eastern Bahia, Brazil: A probable Early Proterozoic subducting relation magmatic arc, J. *5Am. Earth Sci.,* 2, p:131-145.

FULL, W. E. & EPPLER, D. T. 1993. Evaluatin of multichannel Wiener Filters applied to fine resolution passive microwave images of first-year sea ice.

GILLESPIE A. R.; KAHLE A. B.; PALLUCONI, F. D. 1984. Mapping Alluvial Fans in Death Valley, California, Using Multispectral Thermal Infrared Images. *Geophisical ResearchLetters,* Vol. 11. n^0 11,p:1153-1156.

GILLESPIE A. R.; KAHLE A. B.; WALCKER, R. R. 1986. Color Enhancement of Highly Correlated Images. 1. Decorrelation and HSI Contrast Stretches. *Remote Sensing of Environment.* vol. 20,

p:209-23 5.

GONZALES, R. C. & WINTZ, P. 1987. *Digital Image Processing.* Addison-Wesley Pub Co, Reading, Massachusetts, 503 p.

HERNANDES, G. L. S.1994. Processamento digital de imagens Landsat TM e Geoscan AMSS na caracterização lito-estrutural e delimitação de alteração hidrotermal na área do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados, MG. M.Sc. Dissertation, Geosciences Institute, State University of Campinas, Campinas, SP, Brazil. p.1 34.

HUMMER-MILLER, 5. 1990. Techniques for noise removal and registration of TIMS data. *Photogrammetric Enginering and Remote Sensing,* Vol. *56,* n^0. 1, p:49-53.

KAHLE, A. B. & GOETZ A. F. H. 1983. Mineralogic information from a new airborne thermal infrared multispectral scanner. *Science,* 222. P:24-27.

KAHLE, A. B. & ROWAN, L. C. 1980. Evaluation of Multispectral Infrared Aircraft Images for Lithologic mapping in the East Tintic Mountains. Utha Geology, Vol. 3, p:234-23^9.

KAHLE, A. B. 1987. Surface, emittance, temperature , and thermal inertia derived form thermal infrared multispectral seanner (TIMS) data from Death Valley, California: Geophysies, v.52, p:858-87^4.

KAUFMANN, H. 1988. Mineral exploration along the Aqaba-Levant structure by use of TM data: concepts, processing and results. *Internalional Journal of Remote Sensing,* Vol. 9, p:1639-16^{58}.

KISHIDA, A. & RICCIO, L. 1980. Chemostratigraphy of lava sequences from the Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil. *Precambrian Research,* Vol. 11, p: 161 - 178.

KISHIDA, A. 1979. Caracterização geológica e geoquímica das seqüências vulcanosedimentares do médio Rio Itapicuru, Bahia. M.Se. Dissertation, Federal University of Bahia, Salvador, BA, Brazil.

KISHIDA, A.; Sena, F. O. & Silva, F. C. A. 1991. Rio Itapicuru greenstone belt: geology and gold mineralization. In: E.A. LADEIRA (ED), BRAZIL GOLD'9 1, Balkema, Rotterdam, pp.49-59.

LIU J. G. 1991. Balance Contrast Enhancement Technique and its application in image colour composition. *International Journal of Remote Sensing,* Vol 12. n^0 10, p:2133-2151.

LOCKETT, N. H.; de LARGIE, D.; CÔRREA, A. C. 1993. Aerolevantamento multiespectral Geoscan MKII, Área de Santa Luz, Bahia, Brasil. Relatório Técnico Prospec S.A. Proespecções e Aerolevantamentos, v. 1.

LOUGHLIN, W. P. 1991a. Principal component analysis for alteration mapping". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* Vol. 57, N^0. 9, p:1 163-1169.

LOUGHLIN, W. P. 1991b. Relating ground mineralogy via spectral signature to 18-channel airborne imagery obtained with the Geoscan MKII advanced scanner: a 1989 case history from the Leonora, Western Australia, gold district. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 7. Calgary, Canada, 1989. *Proceedings. Calgary,* ERIM.

LYON, R. J. P. & HONEY, F. R. 1990. Direct Mineral Identification (DM1) With Geoscan MKII Advanced Multi-Spectral Scanner (AMSS). PROCEEDING IMAGING SPECTROSCOPY OF THE TERRESTRIAL ENVIRONMENT SOCIETY OF PHOTO OPTICAL INSTRUMENTATION. *Engineers Proceeding Series,* 1298, *p:50-*61

LYON, R. J. P. 1962. Minerals in the infrared - A critical bibliography. Park California, Stan ford Research Institute, 76p.

LYON, R. J. P. 1964. Evaluation of Infrared Spectrophotometry for compositional analysis of lunar and planetary 50i15. Part 1: Rough and powdered surfaces:National Aeronautics And Space Adminstration Contractor Report CR- 100, 1 72p.

MASCARENHAS, J. F. 1973. A geologia do centro-leste do Estado da Bahia. In PROCEEDINGS 27TH BRAZILIAN GEOLOGICAL CONGRESS, Aracaju, Brasil. Vol.2, p.35.

MATOS, F. M. V. & DAVISON, I.1987. Basement or Intrusion? The Ambrósio Dome, Rio Itapicuru Greenstone Belt, Bahia, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.,* Vol. 17, p:442-^{449}.

MOORE, J. McM. & LIU, J. G. 1990. Image enhancement of epithermal gold deposit alteration zones in southeast Spain. Remote Sensing: An Operational Teehnology for the Petroleum and Mineral Industries. Institution of Mining and Metallurgy, London. *Proceedings,* p:4^{9}-^{58}.

PENTEADO, A. H. D. G.; SOUZA, C. R. F; CRÓSTA, A. P. 1997. Filtragem no domínio Fourier de imagens termais do sensor Geoscan coletadas no greenstone belt do Rio Itapicuru, BA - Resultados Preliminares. Bol. Res. Exp. - VII SIMP. QUANT. GEOC. IGCE, UNESP, Rio Claro, SP, 1997, p:118-122.

PODWYSOCKI. M. H.; SEGAL, D. B. & ABRAMS, M. J. 1983. Use of multispectral scanner Images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah mining area. *Economic Geology,* Vol. 78, p: 675-687.

PRADO, I. D. M. 1997, Detecção de zonas de alteração hidrotermal no greenstone belt do Rio Itapicuru, BA, através de técnicas de processamento de imagens Geoscan AMSS / MKII. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Geociências.

PRADO, I. D. M.; CRÓSTA, A. P. 1997. Evaluating Geoscan AMSS MKII for gold exploration in the Fazenda Maria Preta District Rio Itapicuru Greenstone Belt Bahia State, Brazil. Bol IG-USP *Sér. Cient.,* 28:63-83.

REINHARDT, M. C. & DAVISON, I.1990. Structural and lithological controls on gold deposition in the shear zonehosted Fazenda Brasileiro mine, Bahia state, Northeast Brasil, *Econon. Geol., 85,* p:952-967

ROCHA NETO, M. B. 1994. Geologia e recursos minerais do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, Bahia. CBPM, Salvador, *Serie Arquivos Abertos* No. 4.

ROSE, J. F. 1989. Spatial interference in the AVIRIS imaging spectometer. *Photogrammetric Enginering and Remote Sensing,* Vol. 55, n^{0}. 9, p:2465-2472.

SÁ, E. B. 1982. Nota sobre o estilo estrutural e relações gnáissicas vs. supracrustais no greenstone belt de Serrinha (Ba). *Cienc. da Terra* 2: 8-13.

SABINE, C. 1996. Operational Satellite Remote Sensing. American Society of *Photogrametric and Remote Sensing.* Chapter Editor.

SABINE, C.; REALMUTO, V. J.; TARANIK, J. V. 1994. Quantitative estamation of granitoid composition form thermal infrared multispectral scanner (TIMS) data, desolation Wilderness, Northern Sierra Nevada, California. IN: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCII, vol 99, noB3, pp. 4261-4271, Am. Geophy. Union.

SILVA, F. C. A & MATOS, F. M. V. 1991. Economic geology and structural controls of the orebodies from the Medium Itapicuru gold Distriet, *In:* E. A. LADEIRA Ed., GOLD 91, BRAZIL, Balkema, Rotterdam, p:629-635.

SILVA, F. C. A. 1986. Nota Prévia sobre zonas de cisalhamento com e sem mineralizações auríferas no greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia. Relatório Interno Rio Doce Geologia e Mineração 5/A - DOCEGEO, Salvador, Bahia.

SILVA, F. C. A. 1993. Estudo Estrutural do Greenstone Belt Paleoproterozóica do Rio Itapicuru (Bahia): Importância dos granitos sintectônicos, controle das mineralizações auríferas e evolução Transamazônica do Cráton do São Francisco. Prog. Pesq. e Pos Grad. Geofis. (UFBa), Salvador, Bahia.

SILVA, F. C. A. inédito. Estudo estrutural do greenstone belt Paleoproterozóico do Rio Itapicuru

(Bahia): Importância dos granitos sintectônicos, controle das mineralizações auríferas e evolução Transamazônica do cráton São Francisco. Curso de Pós-Graduação em Geologia. UFBa. Salvador, Bahia.

SILVA, F. C. A.; MATTOS, F. M. V. 1991. Econimic Geology and Structural Controls of Orebodies form the Medium Itapicuru Gold District: Rio Itapicuru Greenstone Bel, Bahia Brazil. In: E. a Ladeira, ed. Gold'91, 629-635. Balkema, Rotterdam.

SILVA, F. H. F. & COELHO E. S. C. 1993. Controle estrutural do depósito de ouro Fazenda Maria Preta: Implicações para prospecção aurífera no médio Rio Itapicuru, Bahia. *Anais do I simp.* CSF, Salvador, p:327-330.

SILVA, M. G. & ROCHA NETO, M. B. 1993. Evolução metamórfica do greenstone belt do Rio Itapicuru e suas relações com as mineralizações auríferas. *Anais do JJ Simp. Do CSF,* Salvador, p:323-3[26].

SILVA, M. G. 1984. A sequencia vulcanossedimentar do Médio Rio Itapicuru. Bahia: Caracterização petrográfica. Considerações petrogenéticas preliminares e zoneografia metamórfica, In: Sá, P.V. & Duarte. F. B. (Eds.). *Textos Básicos:* Secretaria de Minas Energia Bahia, V.5, p:6-42.

SILVA, M. G. 1987. Geochemie, Petrologie and geotektonische etwieklung ems Proterozoisehen greunsteignertels, Rio Itapicuru - Bahia, Brasilien, Inedit, Ph. Thesis, Univ. Fraiburg, Germany, 125 p.

SILVA, M. G. 1992. Evidencias isotópicas e geocronológicas de um fenômeno de acrescimento crustal transamazônico no cráton do São Francisco, Estado da Bahia. *Anais do XXXVJL Cong. Bras. Geol.,* SBG, São Paulo, Vol. 2, p:181-182.

SILVA, M. G. 1997. Geoquímica, geocronologia e isótopos (sm-nd e pb-pb) da sequencia vulcano-sedimentar do Rio Itapicuru (Bahia, Brasil) revelando uma parte da história da evolução crustal proterozóica inferior do cráton do São Francisco. *Actas X Semana de Geoquímica* J IV Congresso de Geoquimíca dos Países de Língua Portuguesa Braga, Portugal, p:409-[4]1[2].

SIMPSON, J. J. & YHANN, 5. R. 1994. Reduction of Noise in AVHRR Channel 3 Data with Minimum Distortion. IEEE TRANSECTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING. Vol 32, n^0 2, p:315-328.

SOHA, J. M. & SCHWARTZ, A. A. 1978. Multispectral Histogram Normalization Contrast Enhancement. 5 *th Canadian Symposium on Remote Sensing,* Victoria, August.

SOUZA, C. R F.; DENNISS, A. M.; CASTRO, N. A. 1997. Pratical methods for noise supression of digital imagery, ERIM 12 th THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGYCAL REMOTE SENSING.

SOUZA, C. R. F. & DRURY, S.A. 1997. Periodic supression techniqes applied to multispectral remote sensing data. *Boletim JG* - USP.

SOUZA, C. R. F.; DRURY, 5. A.; DENNISS, A. M.; ROTHERY, D. A.; CARLTON, R. W. T. 1996. Restoration of corrupted optical Fuyo- 1 (JERS-I) data using frequency domain techniques. Photogrammetric Enginering and Remote Sensing, Vol. 62, n^0. 9, p:1037-1047.

SPATZ, D. M. 1996. Remote Sensing strategies in mineral exploration and development: the precious metal and porphyry deposit models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.* Vol. 31, Part B7. Vienna.

TEIXEIRA, J. B. G. 1985. Geologia e controle da mineralização aurífera em Fazenda Brasileiro-Serrinha, Bahia, GEOL. RECUR. MINER. DA BAHIA *Textos Básicos,* 6, p:9-49.

VICKERS, R. K. & LYON, R. J. P. 1967. Infrared sensing from spacecraft: A geological intepreteation.In: Heller, G. B. ed. Thermophysics of spacecraft and planetary bodies.

Radiation properties of solids and the electromagnetic radiation environment in space: New York. Academie Press, Ine. p:585-607.

VINCENT , R. K. 1975. The potential role of thermal infrared multspectral scanners in geologic remote sensing: Institute of Eletrical and Eletronic. *Engineers Proceedings,* v. 63, p.137-147.

VINCENT, R. K.; ROWAN, L. C.; GILLESPIE, R. E.; KNAPP, C. 1975. Thermal infrared spectra and chemical analysis of twenty six igneous rock samples: *Remote Sensig ofEnvironment,* V.4, p: 199-209.

WESTIN, T. 1990. Technical note Filters for removing coherent noise of periodic 2 in SPOT IMAGERY, *International Journal of Remote Sensing,* n^0 2, p:35 1-357

WINDELER, D. S. Jr. 1993. Garnet-pyroxene altertion mapping in the Ludwig Skarn (Yerington, Nevada) with Geoscan Airbome Multispectral Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* vol. 59. No 8. August, p: 1277-1286.

XAVIER, R. P. 1993. Fluidos associados a depósitos de ouro mesotermais do greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia: Principais características e possíveis fontes. *Anais do JJ Simp. do CSF,* Salvador, p:319-322.

XAVIER, R. P., 1991, The role of microstructural and fluid process in the genesis of gold-bearing shear zones: Fazenda Maria Preta mine, Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil. Tese de Doutoramento, Univ. De Southampton, Inglaterra, 241p.