

UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

**PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS LANDSAT/TM E
GEOSCAN/AMSS NA CARACTERIZAÇÃO LITO-ESTRUTURAL
E DELIMITAÇÃO DE ALTERAÇÃO HIDROTÉRMICA NA ÁREA
DO DEPÓSITO AURÍFERO DE RIACHO DOS MACHADOS
(MG)**

GILBERTO LUIS SANCHES HERNANDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

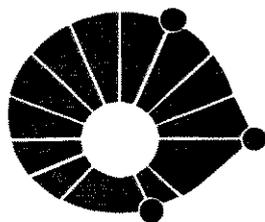
CAMPINAS - SÃO PAULO

DEZEMBRO - 1994

Este exemplar corresponde à
redação final da tese defendida
por *Gilberto L. Sanches Hernandez*
e aprovada em *28/12/94*
em *28/12/94*

ORIENTADOR

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

**PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS LANDSAT/TM E
GEOSCAN/AMSS NA CARACTERIZAÇÃO LITO-ESTRUTURAL
E DELIMITAÇÃO DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NA ÁREA
DO DEPÓSITO AURÍFERO DE RIACHO DOS MACHADOS
(MG)**

GILBERTO LUIS SANCHES HERNANDES

Dissertação/Tese apresentada ao Instituto de Geociências
como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Geociências

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta – IG/UNICAMP

Co-Orientador: Prof. Dr. Alfonso Schrank – IG/UNICAMP

CAMPINAS – SÃO PAULO

DEZEMBRO - 1994

H. 43p

Hernandes, Gilberto Luis Sanches

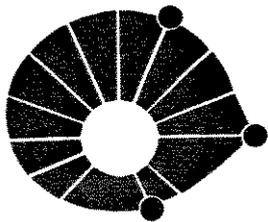
Processamento digital de imagens LANDSAT?TM e GEOSCAN/AMSS na caracterização lito-estrutural e delimitação de alteração hidrotermal na área do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados (MG). Campinas: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Instituto de Geociências. Área de Metalogênese, 1994.

134p. (Dissertação de Mestrado)

Inclui bibliografia

1. Sensoriamento Remoto. 2. Processamento digital de imagens.

CDD - 621.3678



UNICAMP

UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

**PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS LANDSAT/TM E GEOSCAN/AMSS NA
CARACTERIZAÇÃO LITO- ESTRUTURAL E DELIMITAÇÃO DE ALTERAÇÃO
HIDROTHERMAL NA ÁREA DO DEPÓSITO AURÍFERO DE RIACHO DOS
MACHADOS (MG)**

AUTOR: GILBERTO LUIS SANCHES HERNANDES

ORIENTADOR: Prof. Dr. ALVARO PENTEADO CRÓSTA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ALFONSO SCHRANK

COMISSÃO EXAMINADORA

PRESIDENTE: Prof. Dr. ALVARO PENTEADO CRÓSTA

EXAMINADORES: Dr. FERNANDO PELLON DE MIRANDA

Prof. Dr. GILBERTO AMARAL

CAMPINAS, 28 DE DEZEMBRO DE 1994

*A meus pais, Justo e Mariley,
com muito carinho
Obrigado !!!*

AGRADECIMENTOS

Ao final de uma jornada de aproximadamente 3 anos, muitas são as pessoas e entidades à quem gostaria de tecer os mais sinceros agradecimentos. Em decorrência de virtuais esquecimentos, agradeço a todos que participaram, de uma forma ou de outra, nas diversas etapas desta dissertação.

Ao orientador e amigo, Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta, pelo incentivo, dedicação e amizade demonstrada nas diversas etapas do trabalho. A determinação e companheirismo foram grandes na viabilização do projeto (principalmente nas difíceis viagens a Belo Horizonte e Rio de Janeiro), nas "cobranças" quanto aos prazos estabelecidos e principalmente, na publicação dos resultados em diversos tipos de eventos.

Ao co-orientador Prof. Dr. Alfonso Schrank pelo apoio, incentivo e pelas intervenções oportunas na elaboração e desenvolvimento do projeto de tese.

Agradecimentos especiais à analista e amiga Patrícia Leite pela paciência e disposição em ajudar nos problemas com a informática, tornando viável a execução do projeto no prazo previsto e auxiliando na melhoria da reprodução dos produtos gerados.

Aos colegas de mestrado e doutorado da UNICAMP, em especial os geólogos Wilson Oliveira, Edson Ribeiro, Cristina Bicho, Henrique Roig e a bióloga Mônica Takako pelas discussões e auxílios nas diversas etapas do trabalho.

A todos os funcionários do Instituto de geociências, especialmente à Valdirene e ao pessoal da biblioteca.

Agradecimentos especiais ao pessoal do LCC/UFOP, em especial ao Petrus, Puca, Marcílio, Kênia e aos chefes do laboratório André Danderfer e Valter Dornelas.

Ao geólogos e amigos da DOCEGEO Osvaldo Amado Belo de Oliveira e Francisco Robério pela amizade demonstrada e empenho em viabilizar o projeto junto à empresa.

O autor agradece em nome da UNICAMP à DOCEGEO-Geologia e Mineração pelos dados fornecidos, infra-estrutura, material básico, suporte ao projeto e, especialmente, na cessão das imagens GEOSCAN MK-II.

Agradecimentos à COMIG (Companhia Mineradora de Minas Gerais) pela liberação das imagens LANDSAT/TM.

Ao PADCT/Finep (Proc. 65.92.0050.00) e à FAPESP (90/3361-0) pelo apoio ao Laboratório de Processamento de Informações Geo-referenciadas (LAPIG/IG-UNICAMP).

O meu muito obrigado à Beatriz e à Silviane do Centro de Editoração Eletrônica (CEEL/DEGEO-UFOP) pelas impressões da tese.

Agradeço também ao CNPq pela bolsa de mestrado (Proc. 83-0117/94-6)

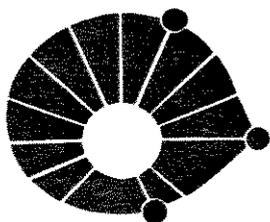
Agradecimentos ao convênio Petrobrás-UFOP-Fundação Gorceix que permitiu a divulgação dos diversos trabalhos referentes à tese, custeando as despesas com viagens e estadias.

Ao Desert Reseach Institute, da Universidade de Nevada, Reno, pelas medidas espectrais das amostras coletadas na área de estudo.

Ao Laboratório Km14 da CVRD pela difratometria de raios-X.

Finalmente, gostaria de manifestar os mais sinceros agradecimentos e também dedicar essa dissertação, pois partilhou comigo os bons e maus momentos que permearam este estudo. Obrigado Estela por ter sacrificado muitos momentos em prol da tese. Um beijo sincero e eterno.

UNIVERSIDADE DE CAMPINAS



UNICAMP

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RESUMO

**PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS LANDSAT/TM E GEOSCAN/AMSS NA
CARACTERIZAÇÃO LITO-ESTRUTURAL E DELIMITAÇÃO DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NA
ÁREA DO DEPÓSITO AURÍFERO DE RIACHO DOS MACHADOS (MG)**

GILBERTO LUIS SANCHES HERNANDES

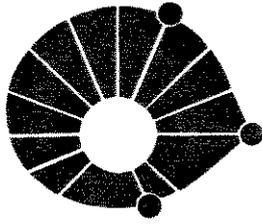
O presente trabalho apresenta os resultados obtidos com a aplicação de técnicas de processamento digital em imagens LANDSAT/TM e GEOSCAN/AMSS na região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados, localizado na porção noroeste do estado de Minas Gerais.

O objetivo geral traçado foi avaliar o desempenho de técnicas de processamento digital de imagens na caracterização de controles litológicos, estruturais e de zonas de alteração hidrotermal associadas à mineralização aurífera na área de estudo.

A aplicação de técnicas adequadas nas imagens LANDSAT/TM permitiram discriminação das principais unidades litológicas, definidas no mapeamento realizado pela ECOGEO (1991), além de identificar ocorrências superficiais de minerais relacionados a processos de alteração hidrotermal. As técnicas aplicadas para realce estrutural não identificaram novas feições em relação ao mapa geológico existente.

Estudos de espectrometria de reflexão e difratometria de raio-X em amostras coletadas na área de estudo permitiram caracterizar um comportamento espectral diferente entre a zona mineralizada e a encaixante, com goetita/sericita-muscovita associados com a zona mineralizada e hematita/kaolinita com a encaixante.

O tratamento dos dados GEOSCAN/AMSS permitiram identificar a ocorrência de minerais de alteração hidrotermal em superfície, mostrando que imagens com maior resolução espacial e espectral podem ser úteis na identificação de áreas potenciais para trabalhos exploratórios mais detalhados.



UNICAMP

UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ABSTRACT

**PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS LANDSAT/TM E GEOSCAN/AMSS NA
CARACTERIZAÇÃO LITO-ESTRUTURAL E DELIMITAÇÃO DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NA
ÁREA DO DEPÓSITO AURÍFERO DE RIACHO DOS MACHADOS (MG)**

GILBERTO LUIS SANCHES HERNANDES

This work presents the results of digital image processing techniques applied to LANDSAT/TM and GEOSCAN/AMSS in the region of the Riacho dos Machados Gold Deposit, in the northwest of Minas Gerais State. The main objective was to evaluate the performance of these techniques for characterizing lithologic and structural controls and hydrothermal alteration zones associated with gold mineralization. The application of selected techniques to LANDSAT/TM allowed discrimination of the main lithologic unities, as defined by ECOGEO (1991), and also the main superficial occurrences of minerals related to hydrothermal alteration. Enhancement of structural information, however, did not add new information to the existing geologic map. Spectrometry and X-ray diffraction studies in samples collected in the study area allowed the characterization of different patterns for the mineralized and host rocks, with goethite/sericite/muscovite being associated with the mineralized zone and hematite/kaolinite associated with host rocks. Processed GEOSCAN/AMSS images allowed the identification of hydrothermal alteration minerals at the surface, showing that remote sensing imagery with greater spatial and spectral resolutions may be useful for identifying areas with greater potential for more detailed exploration activities.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO DA TESE	01
1.2 - OBJETIVOS	02
1.3 - JUSTIFICATIVA DO PROJETO	03
1.4 - METODOLOGIA	03
1.5 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	05
1.6 - ASPECTOS FISIÓGRÁFICOS	05

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 - GEOLOGIA REGIONAL	08
2.2 - GEOLOGIA LOCAL	09
2.2.1 - COMPARTIMENTAÇÃO LITOLÓGICA	11
2.2.2 - GEOLOGIA ESTRUTURAL	18
2.2.3 - EVOLUÇÃO GEOLÓGICA	19
2.2.4 - MINERALIZAÇÃO E ALTERAÇÃO HIDROTERMAL	20

CAPÍTULO 3 - PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT/TM

3.1 - INTRODUÇÃO	23
3.2 - DADOS ESTATÍSTICOS	24
3.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO	26

a) CORREÇÃO GEOMÉTRICA	26
b) CORREÇÃO ATMOSFÉRICA.....	29
3.4 - AUMENTO DE CONTRASTE	30
3.5 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS AO MAPEAMENTO LITOLÓGICO	32
3.5.1 - SELEÇÃO DE ATRIBUTOS.....	32
3.5.2 - COMPOSIÇÃO COLORIDA.....	35
3.5.3 - RAZÃO E SUBTRAÇÃO DE BANDAS	36
3.5.4 - PRINCIPAIS COMPONENTES	43
3.5.5 - DECORRELAÇÃO.....	44
3.5.6 - RESULTADOS OBTIDOS.....	49
3.6 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS AO MAPEAMENTO ESTRUTURAL	49
3.6.1 - FILTROS DIRECIONAIS.....	50
3.6.2 - ILUMINAÇÃO EM TEMPO REAL.....	55
3.6.3 - RESULTADOS OBTIDOS.....	55
3.7 - CONFECÇÃO DE CARTAS-IMAGEM GEOLÓGICAS.....	58
3.8 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS A PROSPECÇÃO MINERAL.....	58
3.8.1 - SUBTRAÇÃO DE BANDAS	60
3.8.2 - ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS (TÉCNICA CRÓSTA).....	61
3.8.3 - RESULTADOS OBTIDOS.....	63

CAPÍTULO 4 - ESPECTROMETRIA DE REFLEXÃO

4.1 - INTRODUÇÃO	65
4.2 - ORIGEM DAS FEIÇÕES ESPECTRAIS RELACIONADAS A MINERAIS DE INTERESSE À PROSPECÇÃO MINERAL.....	66
4.3 - METODOLOGIA	69
4.4 - ANÁLISE DAS CURVAS ESPECTRAIS	72
4.5 - RESULTADOS OBTIDOS.....	89

CAPÍTULO 5 - PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS GEOSCAN

5.1 - INTRODUÇÃO.....	90
5.2 - DADOS ESTATÍSTICOS	91
5.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO.....	97
5.4 - AUMENTO DE CONTRASTE	98
5.5 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS À PROSPECÇÃO MINERAL.....	100

5.5.1 -INTRODUÇÃO.....	100
5.5.2 - SUBTRAÇÃO DE BANDAS.....	104
5.5.3 - PRINCIPAIS COMPONENTES (TÉCNICA CRÓSTA)	108
5.5.4 - RESULTADOS OBTIDOS.....	122
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
ANEXOS	
ANEXO 1 - IMAGENS DIGITAIS E SISTEMAS SENSORES.....	A1
A1.1 - INTRODUÇÃO.....	A1
A1.2 - SENSORIAMENTO REMOTO E ESPECTRO DE REFLEXÃO.....	A1
A1.3 - IMAGENS DIGITAIS.....	A2
A1.4 - SISTEMAS SENSORES.....	A3
A1.4.1 - IMAGEADOR LANDSAT/TM	A5
A1.4.2 - IMAGEADOR GEOSCAN.....	A6
ANEXO 2 - CONFECÇÃO DE CARTAS-IMAGEM	A10

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização e acesso à área	06
Figura 2.1 - Posicionamento geotectônico da área de estudo	08
Figura 2.2 - Mapa geológico regional da região do Depósito de Riacho dos Machados	10
Figura 2.3 - Mapa geológico (ECOGEO, 1991)	12
Figura 2.4 - Mapa geológico (ECOGEO, 1992)	13
Figura 2.5 - Mapa geológico de detalhe (Fonseca, 1993).....	15
Figura 3.1 - GCPs definidos para a imagem de Riacho dos Machados.....	28
Figura 3.2 - Curvas BCET obtidas para a região de Fortaleza de Minas	31
Figura 3.3 - Mapa litológico da área de trabalho com as imagens LANDSAT/TM	33
Figura 3.4 - Composição colorida TM3/TM5/TM4 (RGB)	37
Figura 3.5 - Composição colorida TM4/TM5/TM7 (RGB)	38
Figura 3.6 - Composição colorida TM1/TM2/TM7 (RGB)	39
Figura 3.7 - Composição colorida TM3/TM1, TM5/TM7 e TM4/TM3 (RGB)	41
Figura 3.8 - Composição colorida TM3-TM1, TM5-TM7 e TM4-TM3 (RGB).....	42
Figura 3.9 - Composição colorida PC1, PC2-e PC3.....	45
Figura 3.10 - Composição colorida PC4, PC5 e PC6.....	46
Figura 3.11 - Decorrelação aplicada em TM1/TM2/TM7 - DCL 127 (RGB).....	47
Figura 3.12 - Decorrelação aplicada em TM1/TM5/TM4 - DCL 154 (RGB).....	48
Figura 3.13 - Filtros direcionais aplicados na TM4 e PC1.....	50
Figura 3.14 - Filtro direcional NE-SW aplicado na imagem TM4.....	51
Figura 3.15 - Filtro direcional NE-SW aplicado na imagem PC1.....	52
Figura 3.16 - Filtro direcional NW-SE aplicado na imagem TM4.....	53
Figura 3.17 - Filtro direcional NW-SE aplicado na imagem PC1.....	54
Figura 3.18 - Iluminação em tempo real aplicada sobre a imagem TM4.....	56
Figura 3.19 - Lineamentos traçados a partir de imagens geradas para realce estrutural sobrepostos à imagem TM4 com filtro NW-SE	57
Figura 3.20 - Exemplo de confecção de carta-imagem geológica	59
Figura 3.21 - Composição colorida das componentes determinadas na Técnica Crósta.....	64
Figura 4.1 - Feições associadas à transição eletrônica de óxidos/hidróxidos de ferro	67
Figura 4.2 - Feições de absorção características da kaolinita	68
Figura 4.3 - Feições de absorção características da sericita-muscovita	69

Figura 4.4 - Curva espectral da amostra RM06	74
Figura 4.5 - Curva espectral da amostra RM07	74
Figura 4.6 - Curva espectral da amostra RM08	74
Figura 4.7 - Curva espectral da amostra RM11	75
Figura 4.8 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM06	75
Figura 4.9 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM07	75
Figura 4.10 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM08	76
Figura 4.11 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM11	76
Figura 4.12 - Curvas espectrais das amostras RM12 e RM13	78
Figura 4.13 - Curvas espectrais das amostras RM14 e RM15	78
Figura 4.14 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM12	78
Figura 4.15 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM13	79
Figura 4.16 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM14	79
Figura 4.17 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM15	79
Figura 4.18 - Curvas espectrais das amostras RM16 e RM17	81
Figura 4.19 - Curvas espectrais das amostras RM18 e RM19	81
Figura 4.20 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM16	82
Figura 4.21 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM17	82
Figura 4.22 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM18	83
Figura 4.23 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM19	83
Figura 4.24 - Curva espectral da amostra RM38	85
Figura 4.25 - Curva espectral da amostra RM39	85
Figura 4.26 - Curva espectral da amostra RM40	86
Figura 4.27 - Curva espectral da amostra RM41	86
Figura 4.28 - Curva espectral da amostra RM42	86
Figura 4.29 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM38	87
Figura 4.30 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM39	87
Figura 4.31 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM40	87
Figura 4.32 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM41	88
Figura 4.33 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM42	88
Figura 5.1 - Imagem original GEOSCAN/AMSS com dimensões de 2201x751 pixels	99
Figura 5.2 - Curvas espectrais de alguns minerais e rochas em relação ao sensor GEOSCAN MKII na porção do espectro eletromagnético VNIR	101
Figura 5.3 - Curvas espectrais de alguns minerais e rochas em relação ao sensor GEOSCAN MKII na porção do espectro eletromagnético SWIR	102
Figura 5.4 - Curvas espectrais de alguns minerais e rochas em relação ao sensor GEOSCAN MKII na porção do espectro eletromagnético TIR	103

Figura 5.5 - Composição colorida RGB GSC2-GSC1, GSC3-GSC2, GSC6-GSC8.....	106
Figura 5.6 - Composição colorida RGB GSC12-GSC16, GSC12-GSC14, GSC15-GSC17107	
Figura 5.8 - PC4 contendo a informação relacionada à ocorrência de hematita	112
Figura 5.9 - PC4 contendo a informação relacionada à ocorrência de goetita	113
Figura 5.10 - PC4 contendo a informação relacionada à ocorrência de clorita/calcita.....	114
Figura 5.11 - PC4 contendo a informação relacionada à ocorrência de sericita-muscovita/ kaolinita.....	115
Figura 5.12 - PC4 contendo a informação relacionada à ocorrência de sílica	116
Figura 5.13 - PC contendo a informação de goetita e muscovita-sericita/kaolinita	117
Figura 5.14 - PC contendo a informação de goetita e clorita	118
Figura 5.15 - PC contendo a informação de goetita e sílica	119
Figura 5.16 - PC contendo a informação de kaolinita e sílica	120
Figura 5.17 - Composição colorida contendo a informação de goetita e muscovita- sericita.....	121
Figura A1.1 - Elementos envolvidos no processo de aquisição de dados	A2
Figura A1.2 - Regiões do espectro eletromagnético.....	A2
Figura A1.3 - Exemplo de estrutura de uma imagem quadriculada	A3
Figura A1.4 - Níveis de aquisição de dados.....	A4
Figura A1.5 - Distorções de roll, pitch e yaw.....	A8
Figura A2.1 - Parâmetros oferecidos pelo programa ER-Mapper para definição de grids	A10
Figura A2.2 - Comandos do recurso annotation overlay	

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Geologia regional do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados.....	09
Tabela 3.1 - Valores de DN, média e desvio padrão para a imagem de Riacho dos Machados	24
Tabela 3.2 - Matriz de correlação.....	25
Tabela 3.3 - Matriz de variância-covariância.....	25
Tabela 3.4 - Coordenadas Geográficas dos GCPs.....	27
Tabela 3.5 - Métodos de interpolação.....	29
Tabela 3.6 - Valores de DN devido ao efeito atmosférico encontrados em cada banda	30
Tabela 3.7 - OIFs para as imagens LANDSAT/TM da área de Riacho dos Machados.....	34
Tabela 3.8 - Performance de cada técnica na discriminação litológica.....	49
Tabela 3.9 - Coeficientes dos autovetores para o conjunto TM1/TM3/TM4 e TM5.....	61
Tabela 3.10 - Coeficientes dos autovetores para o conjunto TM1/TM4/TM5 e TM7	62
Tabela 4.1 - Características das amostras analisadas (Seção I)	71
Tabela 4.2 - Características das amostras analisadas (Seção II)	71
Tabela 4.3 - Características das amostras analisadas (Seção III)	71
Tabela 4.4 - Características das amostras analisadas (Seção IV).....	72
Tabela 5.1 - Valores de média e desvio padrão obtidos para a imagem GEOSCAN/AMSS92	
Tabela 5.2 (a) - Matriz de correlação (bandas 1 a 12)	93
Tabela 5.2 (b) - Matriz de correlação (bandas 13 a 24)	94
Tabela 5.3 (a) - Matriz de covariância (bandas 1 a 12).....	95
Tabela 5.3 (b) - Matriz de covariância (bandas 13 a 24).....	96
Tabela 5.4 - Coeficientes dos autovetores para realce de hematita	109
Tabela 5.5 - Coeficientes dos autovetores para realce de goetita	109
Tabela 5.6 - Coeficientes dos autovetores para realce de clorita/calcita	110
Tabela 5.7 - Coeficientes dos autovetores para realce de muscovita-sericita/kaolinita	110
Tabela 5.8 - Coeficientes dos autovetores para realce de sílica.....	110
Tabela A1.1 - Principais aplicações das bandas do LANDSAT/TM	A5
Tabela A1.2 - Principais aplicações das bandas do GEOSCAN.....	A6
Tabela A1.3 - Cobertura espectral do Geoscan MKII.....	A7

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO DA TESE

O desenvolvimento tecnológico nos métodos de aquisição e manipulação de dados da superfície terrestre trouxe novas rotinas aos trabalhos de exploração geológica. Técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), aplicadas em imagens de satélite, geofísicas, geoquímicas ou fotografias aéreas, têm servido de suporte a trabalhos de mapeamento geológico e prospecção mineral, onde *softwares* de PDI incorporam recursos que possibilitam processar um enorme volume de dados num curto espaço de tempo. Conseqüentemente, os métodos convencionais de tratamento e interpretação de dados geológicos estão sendo reformulados, adotando-se técnicas computacionais como instrumentos de trabalho de rotina no meio geológico.

Diante deste contexto, selecionou-se a região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados como área teste para aplicação de diversas técnicas de processamento digital de imagens, utilizando dados adquiridos por sensor orbital (dados LANDSAT/TM) e sensor aerotransportado (GEOSCAN/AMSS). Além disso, a área apresenta características que limitam o uso de técnicas convencionais de mapeamento geológico e de prospecção, tais como elevado grau de intemperismo das rochas, extensa cobertura vegetal, além de uma geologia complexa, que carece de um volume maior de dados para que se possa realizar uma interpretação com maior confiabilidade.

Este estudo apresenta uma avaliação da utilização de sensores aerotransportados com alta resolução espectral e espacial no Brasil, onde a disponibilidade de dados desse tipo é ainda muito restrita. O uso desses dados, somados aos dados de espectrometria de reflexão para estudo do comportamento espectral de minerais de interesse, podem superar algumas limitações dos sensores orbitais atualmente disponíveis (LANDSAT/TM e SPOT/HRV entre outros). Estes possuem resoluções espectrais bastante limitadas para identificação de minerais de interesse (entre 4 e 7 bandas cobrindo intervalos relativamente grandes do espectro), além de possuírem resoluções espaciais baixas (entre 10 e 30 metros).

Finalmente, espera-se contribuir com este estudo para o aprimoramento do uso de técnicas de PDI em trabalhos de mapeamento geológico e exploração mineral, para que essa ferramenta passe realmente a ser utilizada da forma mais eficaz possível.

1.2 - OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é avaliar o desempenho do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto na caracterização de controles litológicos, estruturais e de zonas de alteração hidrotermal associadas à mineralização aurífera, utilizando-se imagens LANDSAT/TM e GEOSCAN/AMSS, na área do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados (MG).

Visando atingir o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

⇒ Tomando-se como base o mapa geológico de detalhe confeccionado pela ECOGEO (1991), foram aplicadas técnicas de processamento digital nas imagens LANDSAT/TM, no sentido de avaliar quais técnicas são potencialmente favoráveis à identificação de determinadas litologias e o quanto essas imagens podem ser úteis na confecção de mapas de lineamentos. Além disso, procurou-se testar a viabilidade do uso de técnicas específicas para identificar minerais de alteração hidrotermal, que possam servir de suporte nas fases iniciais dos trabalhos de prospecção.

⇒ Aplicar técnicas de processamento digital nas imagens GEOSCAN, visando otimizar a extração do grande volume de informações contidos nesses dados. Através dessas técnicas, procurou-se visualizar nessas imagens quais seriam as áreas com maior potencial para concentrações auríferas na região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados.

⇒ Avaliar a aplicabilidade de estudos de espectrometria de reflexão na área de pesquisa, procurando correlacionar a resposta espectral de amostras de rochas hidrotermalmente alteradas com as feições espectrais observadas nas imagens.

⇒ Caracterizar as vantagens e desvantagens na utilização dos diferentes tipos de dados de Sensoriamento (TM-LANDSAT, GEOSCAN e espectrometria de reflexão) na área de estudo, tentando desenvolver uma metodologia de trabalho e uma rotina de processamento de imagens que auxilie na definição de novas áreas potenciais para

mineralização aurífera na região de Riacho dos Machados (MG) e em outras regiões com o mesmo contexto geológico.

1.3 - JUSTIFICATIVA DO PROJETO

As principais justificativas para a execução do projeto são as seguintes:

⇒ A região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados constitui-se numa área teste adequada para aplicação de técnicas de PDI. A região contém uma mina de ouro em processo de exploração e algumas regiões com conhecimento geológico de detalhe. Além disso, o uso de métodos convencionais de mapeamento e análise fotogeológica não é efetivo, por causa da geologia complexa, presença de poucos afloramentos, elevado grau de intemperismo das rochas e espessa cobertura vegetal.

⇒ Os trabalhos de prospecção utilizam métodos *convencionais* para identificação de novos alvos: levantamentos geoquímicos (sedimentos de corrente, concentrado de batêia e amostragem de solo) e geofísicos (magnetometria, gama, gravimetria, Polarização Induzida, etc). Porém, esses métodos frequentemente apresentam dificuldades na identificação de zonas de alteração hidrotermal dentro da Sequência Ouro Fino (hospedeira da mineralização aurífera). Isso viabiliza o uso de outras ferramentas de prospecção, tais como a aplicação de sensoriamento remoto.

⇒ A região de Riacho dos Machados foi uma das primeiras no Brasil a ser coberta por um sensor de alta resolução espectral e espacial (GEOSCAN/AMSS), constituindo-se numa área com um considerável acervo de dados sensoriamento remoto, que necessitam ser processados e interpretados.

⇒ O Brasil já possui uma rotina em pesquisas envolvendo processamento digital de imagens (PDI) de sensoriamento remoto, onde inúmeras instituições contam com laboratórios de processamento e análise de informações geológicas e cartográficas.

1.4 - METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo, visando atingir os objetivos traçados, envolveu uma revisão bibliográfica, processamento de imagens, trabalhos de campo e análises de laboratório.

A pesquisa teve início com uma revisão bibliográfica referente à temática da pesquisa e da área a ser pesquisada, assim como aquisição dos dados a serem utilizados. A formação teórica e prática básica foi obtida através de cursos específicos de sensoriamento remoto, que serviram de suporte para a estruturação da dissertação. Os trabalhos cujos enfoques se relacionavam aos objetivos deste trabalho foram analisados com maior profundidade e muitas técnicas adaptadas para este trabalho.

O passo seguinte consistiu do tratamento dos dados LANDSAT/TM para realce de litologias, feições estruturais e identificação de regiões contendo minerais relacionados com a mineralização aurífera. Utilizou-se técnicas convencionais de processamento digital de imagens, disponíveis na literatura e nos *softwares* I2S e ER-Mapper (instalados em estações de trabalho Sun, com sistema operacional SunOs/Unix), disponíveis no Laboratório de Processamento de Informações Geo-referenciadas (LAPIG) do IG/UNICAMP. Basicamente, as técnicas foram selecionadas em função do sucesso que outros pesquisadores conseguiram obter aplicando-as em outras áreas. Porém, grande parte dos trabalhos se desenvolveram em áreas de clima árido/semi-árido, cujas características são extremamente favoráveis à estudos utilizando dados de sensoriamento remoto. No Brasil, onde grande parte do território não apresenta esse tipo de clima, existe ainda uma carência de trabalhos utilizando esse tipo de dado. Podemos citar como exemplo de sucesso os trabalhos realizados por Meneses (1986), Paradella (1987), Crósta (1990) e Ferreira Jr. (1993).

Os resultados obtidos com o processamento dos dados LANDSAT/TM foram checados em um primeiro trabalho de campo, no qual procurou-se comparar as informações contidas nas imagens com as informações representadas no mapa geológico disponível. Além disso, foram coletadas amostras de material superficial para espectrometria de reflexão e difratometria de raio-X. Esta etapa de campo serviu de subsídio para concluir o tratamento dos dados LANDSAT/TM e definir a área para se trabalhar com os dados GEOSCAN/AMSS (região com maior número de anomalias).

O passo seguinte foi analisar os dados GEOSCAN/AMSS, através da aplicação de técnicas específicas para caracterização de minerais de alteração hidrotermal. Em paralelo a isso, foi realizada a preparação das amostras para espectrometria de reflexão e raio-X coletadas na primeira etapa de campo. Assim que ficaram prontas essas análises, passou-se à interpretação das curvas espectrais e dos difratômetros de raio-X obtidos a partir de cada amostra coletada.

Uma segunda etapa de campo foi realizada para se efetuar a verificação final dos resultados obtidos, passando-se então às modificações finais e conclusão da dissertação.

1.5 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área pesquisada (Figura 1.1) localiza-se a sudoeste do município de Riacho dos Machados, na porção norte do Estado de Minas Gerais, distando aproximadamente 560 Km de Belo Horizonte. Os limites estão fixados segundo as coordenadas UTM 8 233 900 / 8 221 500 S e 694 000 / 706 400 W. Este segmento possui uma extensão aproximada de 12.4x12.4 km, em uma área próxima de 154 km², ocupando parte das quadriculas 1:100.000 de Janaúba (SE-23-Z-D-IV) e Francisco Sá (SE-23-X-B-I), editadas pelo IBGE.

O acesso à área, partindo-se de Belo Horizonte, pode ser feito via Montes Claros, percorrendo 440 quilômetros ao longo das BR-040 e BR-135. A partir daí, percorre-se 116 quilômetros pela MG-251 até a localidade de Caveira, onde toma-se então estrada não pavimentada (MG-120) até a cidade de Riacho dos Machados.

1.6 - ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

O clima na região de Riacho dos Machados é caracterizado por duas estações bem definidas, marcadas por um período de chuvas (entre outubro e março) e um período de estiagem (entre abril e setembro), podendo ser classificado de acordo com Koppen (in: King, 1956) como do tipo Cwa. A temperatura oscila entre 19°C e 39°C (média em torno de 24°C). Os índices pluviométricos indicam uma média anual de 900mm. Essas condições climáticas indicam que durante os meses de abril a setembro, devam ser programados os trabalhos de aquisição de dados.

O relevo é composto por áreas arrasadas de morfologia ondulada, cercadas por serras de direção NNE-SSW, semelhante ao que ocorre a nível regional com a Serra do Espinhaço. Essas serras são geralmente constituídas por quartzitos, que formam escarpas íngremes em função da alta resistência à erosão. Nas partes mais arrasadas as cotas topográficas variam de 700 a 850 metros, enquanto nas serras as cotas variam de 900 a 1000 metros. Nas imagens LANDSAT/TM e GEOSCAN/AMSS, essas escarpas são bem definidas em função do sombreamento topográfico, apresentando-se como áreas escuras.

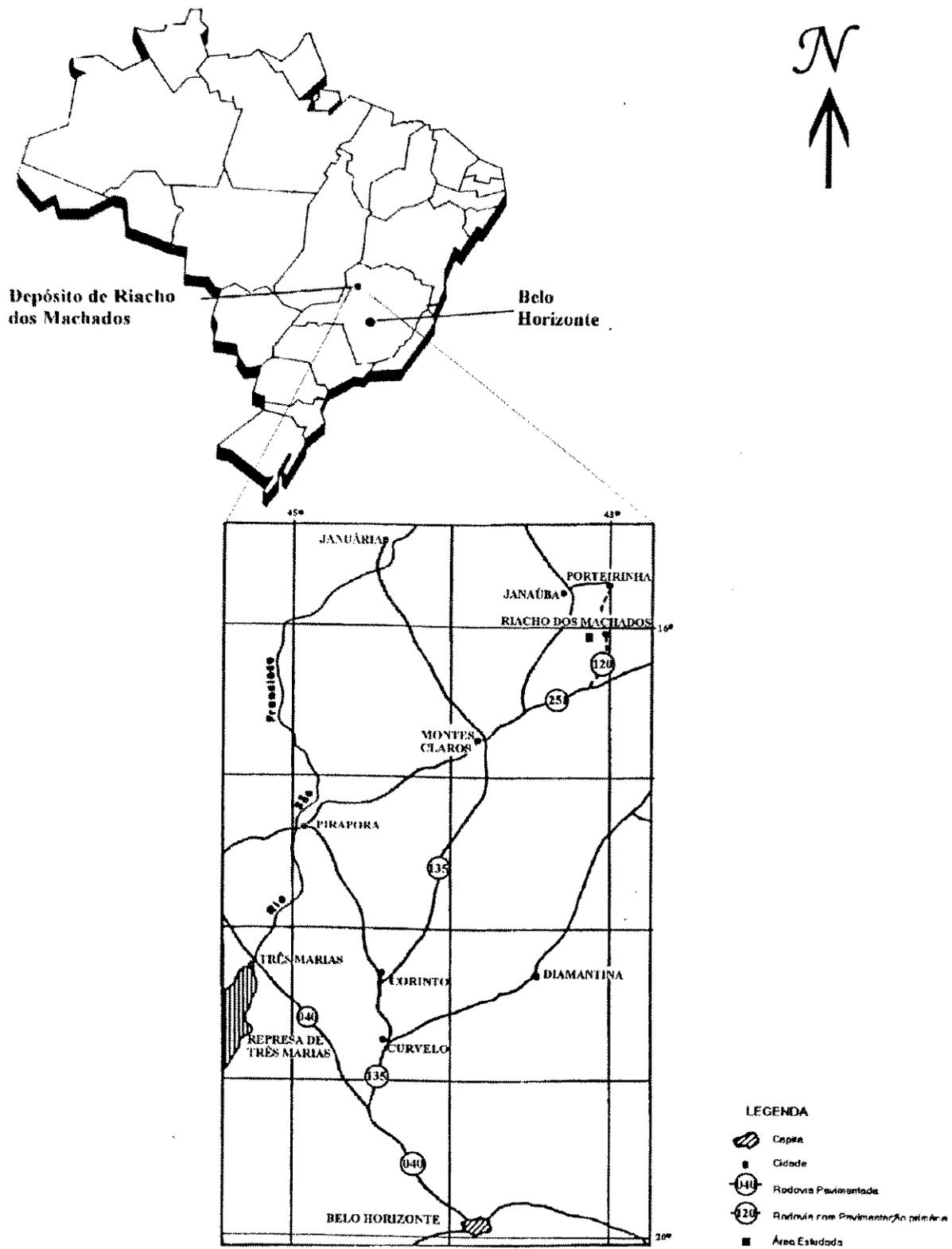


Figura 1.1 - Localização e acesso à área

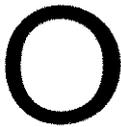
A Serra do Espinhaço se constitui no grande divisor de águas da região, pois separa a Bacia do Rio São Francisco das Bacias dos Rios Pardo e Jequitinhonha. Localmente, os principais cursos d'água são os ribeirão Confisco e seu afluente Piranga. O primeiro deságua no Rio Gurutuba, pertencente à bacia do Rio São Francisco. Observa-se que a rede hidrográfica é reflexo direto dos aspectos topográficos, geológicos e estruturais, sendo pouco densa e variando de retangular a dendrítica. Este padrão é de fácil visualização nas imagens e se constitui na principal feição para interpretação estrutural regional, juntamente com as escarpas de quartzito. Mata-galerias ocorrem geralmente associadas às drenagens, que podem ajudar a realçar as feições estruturais nas imagens.

A vegetação da região corresponde à uma zona de transição entre o cerrado (predominantemente arbustivo) e a caatinga. Porém, o que se observa é uma alta taxa de degradação das espécies naturais, com extensos reflorestamentos de eucalíptos recobrendo a paisagem natural. Esses reflorestamentos geralmente cobrem áreas de sedimentos Terciários e Quaternários da região. Litologias e solos de composição mais básica permitem o desenvolvimento de uma vegetação um pouco mais densa, quando comparada com a vegetação rala que se desenvolve sobre litologias e solos mais ácidos. Nas imagens LANDSAT/TM esta vegetação se constitui numa barreira, pois a resolução espacial de 30 metros muitas vezes não permite discriminar vegetação de litologia ou solo. No caso das imagens GEOSCAN, com resolução de 5 metros, regiões pequenas onde não ocorre vegetação podem ser caracterizadas e o tipo de solo ou litologia definido.

CAPÍTULO 2

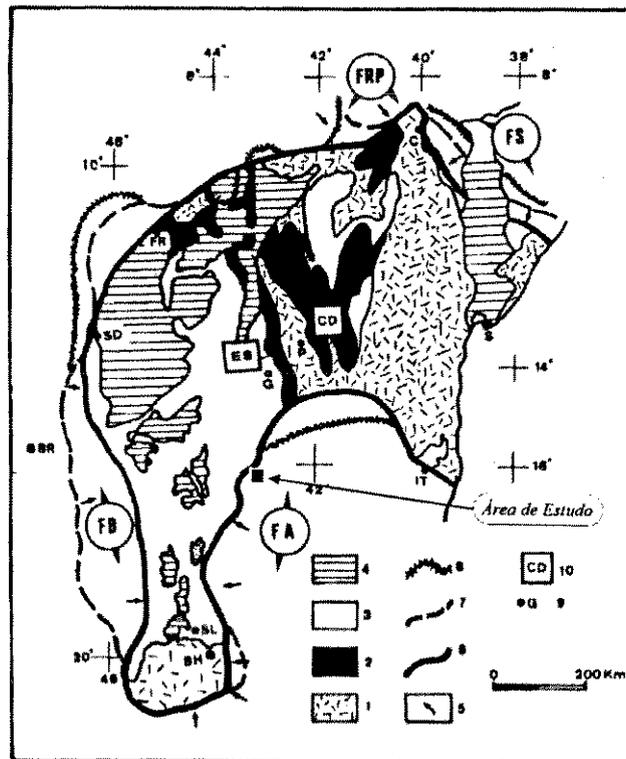
CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 - GEOLOGIA REGIONAL



(Figura 2.1).

Depósito Aurífero de Riacho dos Machados encontra-se inserido na Faixa de Dobramentos Araçuaí da Província Mantiqueira (Almeida, 1977), de idade Proterozóica Superior, na borda sudeste do Cráton São Francisco



1. Embasamento do Cráton; 2. Coberturas pré-brasilianas; 3. Coberturas brasileiras; 4. Coberturas fanerozóicas; 5. Vergência das faixas de dobramentos brasilianas; 6. Limite do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977); Limites corrigidos por Almeida (1981) e Mascarenhas et al. (1984); Limites gravimétricos (Mascarenhas et al., 1984); 9. Cidades; 10. Províncias fisiográficas.

Figura 2.1 - Posicionamento geotectônico da área de estudo (Alkmim et al., 1992)

Trabalhos pioneiros de mapeamento geológico regional na área, executados por Costa et al. (1976), Costa e Romano (1976), Almeida (1977), Fontes et al. (1978), Drummond et al. (1980) e Siga Junior (1986), apud Fonseca et al. (1991), identificaram 4 unidades Pré-Cambrianas principais (Figura 2.2): Embasamento granítico-gnáissico, Supergrupo Espinhaço, Grupo Macaúbas e Grupo Bambuí. Uma descrição sumária dessas unidades é apresentada na Tabela 2.1.

EMBASAMENTO GRANÍTICO-GNÁISSICO (Almeida - 1977)	Gnaisses, granitos foliados, migmatitos e faixas metavulcano-sedimentares Arqueanas	Arqueano a Proterozóico Inferior
SUPERGRUPO ESPINHAÇO (Druper - 1920, in Mascarenhas et al. 1984)	Sequência de metassedimentos (Quartzitos, filitos, conglomerados), com intercalações de meta-ígneas ácidas	Proterozóico Médio
GRUPO MACAÚBAS (Moraes & Guimarães - 1930, in Mascarenhas et al. 1984)	Metassiltitos, quartzitos e metadiamicititos	Proterozóico Superior
GRUPO BAMBUÍ (Rimman - 1917, in Mascarenhas et al. 1984)	Metassiltitos e metarcóseos	Proterozóico Superior

Tabela 2.1 - Geologia regional do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados

2.2 - GEOLOGIA LOCAL

O conhecimento geológico na região de Riacho dos Machados teve uma evolução com o início dos trabalhos de exploração pela DOCEGEO, através de mapeamentos geológicos de detalhe e semi-detalhe (Silva, 1987; Leal et al., 1989). As pesquisas mais recentes foram realizadas pela ECOGEO (1991 - escala 1:25.000; 1992 - escala 1:50.000) e Fonseca (1993), permitindo uma melhor compreensão da geologia e uma melhor compartimentação das diversas unidades presentes na região.

O mapeamento realizado pela ECOGEO (1991), na escala 1:25.000, caracterizou as principais litologias aflorantes na região do Depósito de Riacho dos Machados e o arcabouço tectônico dessas unidades. O mapa geológico gerado (Figura 2.3) serviu de subsídio para que se realizasse um mapeamento a nível mais regional, na escala 1:50.000, caracterizando melhor as unidades previamente definidas e a abrangência regional de cada uma (Figura 2.4). Em paralelo a esses trabalhos, Fonseca (1993) realizou trabalho de detalhe no Depósito de Riacho dos Machados, tendo caracterizado as principais unidades aflorantes e processos hidrotermais relacionados. Conseqüentemente, os dados geológicos aqui apresentados para a região do Depósito de Riacho dos

Machados foram baseados nos trabalhos da ECOGEO (1992) e Fonseca (1993), pois representam os trabalhos mais recentes na região e englobam todos os anteriores.

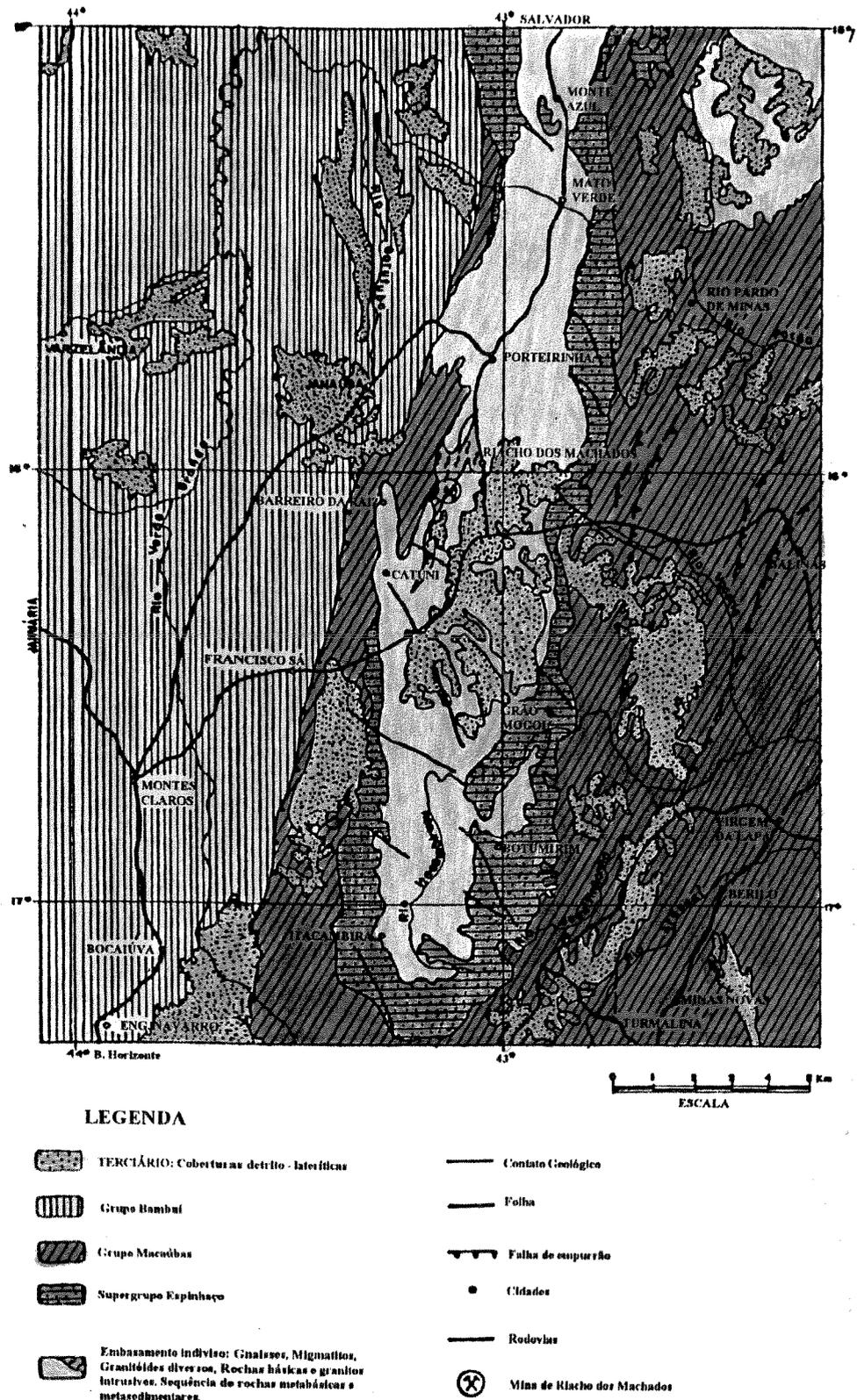


Figura 2.2 - Mapa geológico regional da região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados (Guimarães et al., 1993)

2.2.1 - COMPARTIMENTAÇÃO LITOLÓGICA

Os mapeamentos realizados pela ECOGEO (1991 e 1992) permitiram estabelecer que a geologia na região do Depósito de Riacho dos Machados está condicionada por uma janela estrutural, denominada por Guimarães et al. (1993) de Bloco Itacambira-Monte-Azul (BIMA), onde afloram rochas cristalinas geradas até o final do Ciclo Transamazônico. Delimitando esse bloco ocorrem rochas metassedimentares dos supergrupos Espinhaço (Proterozóico Médio) e São Francisco (Proterozóico Superior). Além disso, esses mapeamentos individualizaram 7 unidades litoestratigráficas na região de Riacho dos Machados: Complexo Metamórfico Córrego do Cedro (CMCC), Grupo Riacho dos Machados (GRM), Suíte Granitóide Pedra do Urubu (SGPU), Suíte Granitóide Gorutuba (SGG), Suíte Monzonítica Paciência (SMP), Suíte Granítica Confisco (SGC) e Coberturas detríticas. Ocorrem também basaltos e diabásios relacionados à abertura do Atlântico Sul (Mesozóico).

2.2.1.1 - COMPLEXO METAMÓRFICO CÓRREGO DO CEDRO

Esta unidade, a mais antiga da região, possui uma grande extensão areal e é constituída por gnaisses leucocráticos bandados de composição granítica (composição mineralógica a base de quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, biotita e muscovita), com intercalações métricas a decimétricas de anfíbolitos, serpentinitos e talco-xistos. Observa-se localmente estruturas tipo nebulítica e *schlieren*, provavelmente associadas a processos de migmatização.

A sobreposição de eventos deformacionais provocou modificações nas características estruturais e mineralógicas das rochas dessa unidade, onde os gnaisses perdem a sua estrutura bandada e passam a ter estruturas xistificadas. Isso provoca uma certa dificuldade quanto à caracterização da origem destas rochas.

2.2.1.2 - GRUPO RIACHO DOS MACHADOS

Esta unidade encontra-se encaixada no Complexo Metamórfico Córrego do Cedro, com os contatos definidos por zonas de cisalhamento de médio a alto ângulo. Ocorrem rochas de natureza metaígneia e rochas de natureza metassedimentar, sendo possível agrupá-las em duas unidades: Unidade Ouro Fino e Unidade Córrego Rodeador. Novos mapeamentos de detalhe podem vir a compartimentar melhor esta unidade no futuro.

CENOZOICO

TO DOBERTURAS DETRITO-LATERÍTIICAS

GRUPO MACAÚBAS

DE-SMS FLUTOS

ME-MC META-PARACONCLOMERADOS POLIMÍTIICOS + QUARTZITOS

GRUPO RIACHO DOS MACHADOS

ARG UNIDADE OURO FINO ANFIBOLITOS FINOS

ARX UNIDADE OURO FINO XISTOS PARA-DEBVARIOS

ARD UNIDADE CORREGO RODEADOR INTERCALACAO DE DIVERIAS LITOLOGIAS DE NATUREZA MAZA E SEDIMENTAR

COMPLEXO METAMORFICO CORREGO DO CEDRO

AG G GNAISSES LEUCOCRATICOS DE COMPOSICAO GRANITICA

SUITE GRANITOIDE PEDRA DO URUBU

OG G GNAISSES ORTODERIVADOS LEUCOCRATICOS DE COMPOSICAO GRANITICA

INTRUSIVAS

GV G SUITE GRANITICA CONFUSO ROCHAS GRANITICAS E ROCHAS QUARTZO FELDSPÁTICAS

VB G SUITE MONZONITICA PACENCIA ROCHAS ALGALINAS DE COMPOSICAO MONZONITICA

IB G META-BÁSICAS

CONTATOS

DEFINIDOS

APROXIMADOS

INFERIDOS

FALHAS DE CAVALGAMENTO

DEFINIDAS

APROXIMADAS

INFERIDAS

FALHAS TRANSCORRENTES

DEFINIDAS

APROXIMADAS

INFERIDAS

FALHA INDESCRIMINADA S-BLOCO SOBORDADO; DENTES NO BLOCO BASCULADO; RELEVO ESPECIFICO QUANDO INDICADO

ATTUDE DE ACAMAMENTO

ATTUDE DE BANDAMENTO

ATTUDE DE XISTOSIDADE

ATTUDE DE FOLIAÇÃO MILONITICA

ATTUDE DE CLIVAGEM

LINEACOES MINERAIS E DE ALONGAMENTO

ESTRUTURAS LÓMICAS

EIXOS DE ANTIFORME COM CAIMENTO

EIXOS DE SINFORME COM CAIMENTO



0 250 500 750 1000 m.

VILAS

FUROS DE SONDIA

MINA DE OURO

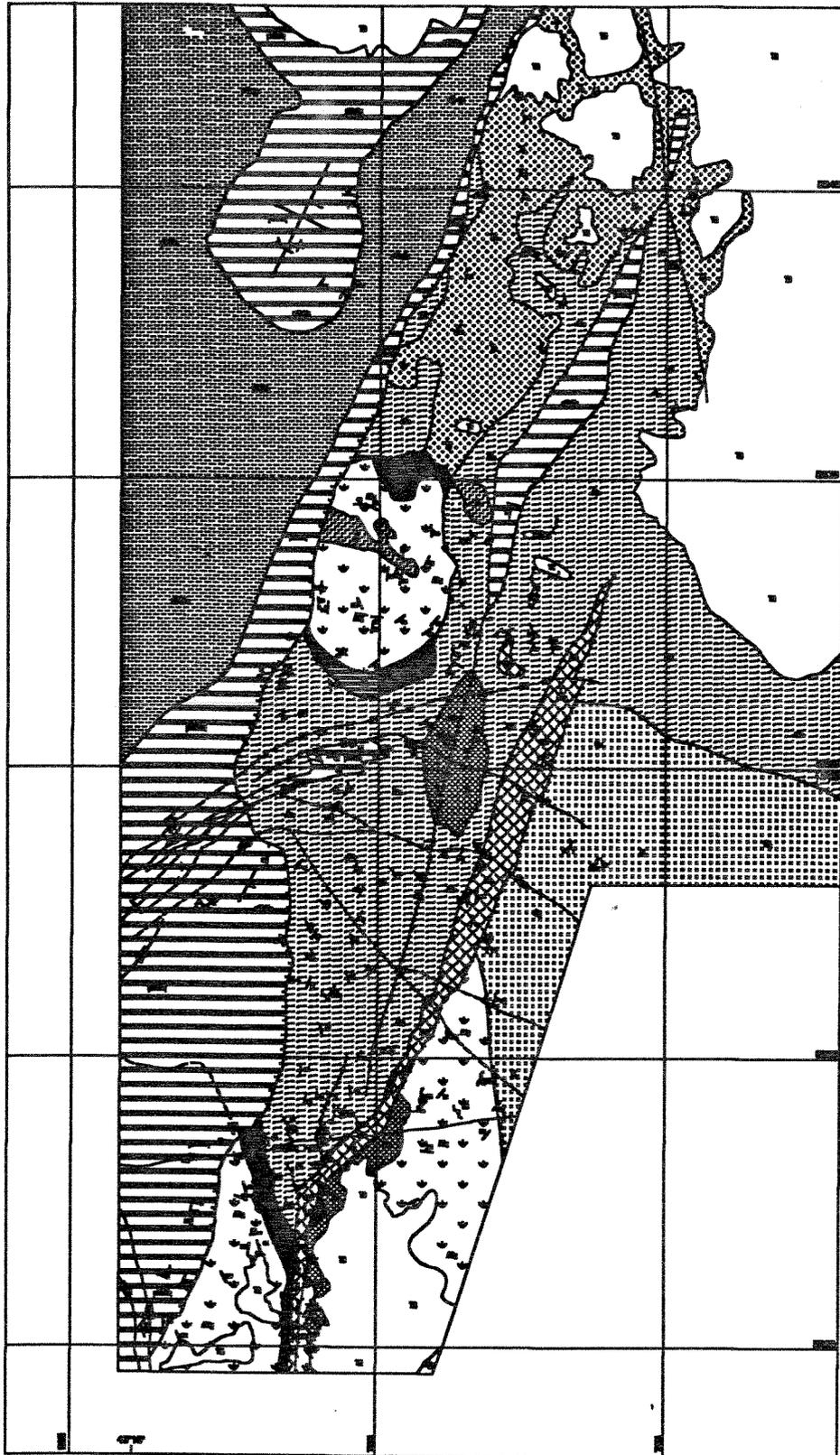


Figura 2.3 - Mapa geológico (ECOGEO, 1991), com legenda adaptada de ECOGEO, 1992

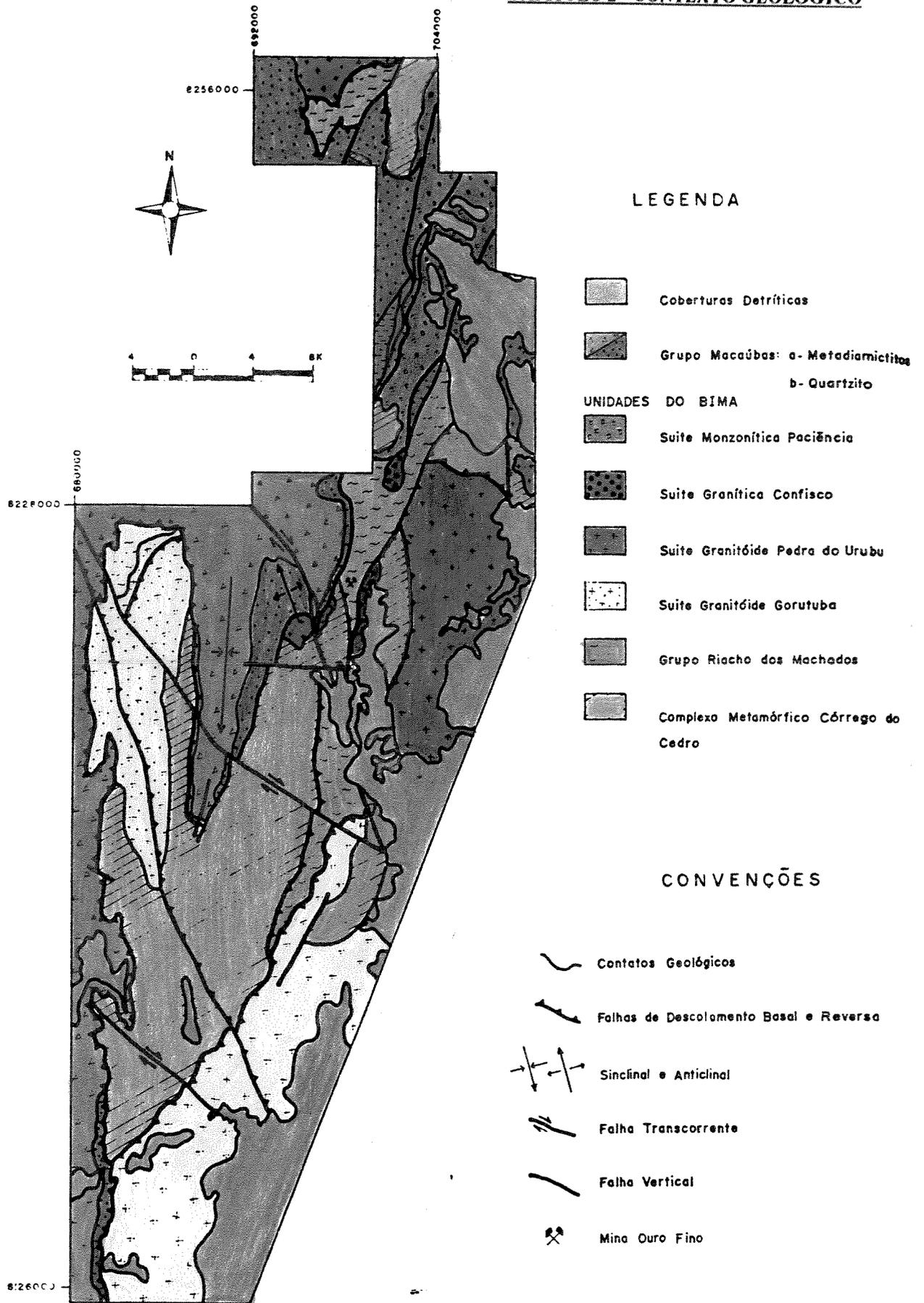


Figura 2.4 - Mapa geológico (ECOGEO, 1992) (Guimarães et al. 1993)

(A) UNIDADE OURO FINO

Esta unidade é constituída por xistos para-derivados e anfibolitos subordinados.

Os anfibolitos possuem granulação fina e bandamento milimétrico, marcado pela alternância de bandas escuras (actinolita e/ou hornblenda) e bandas claras (plagioclásio). Apresentam coloração cinza-escuro a preto e, quando intemperizados, apresentam cores avermelhadas. Processos deformacionais muitas vezes destroem o bandamento, formando rochas xistificadas ricas em clorita e muscovita. Especula-se (ECOGEO, 1992) sobre a possibilidade dessas rochas corresponderem a derrames vulcânicos (granulação muito fina). Além disso, elas estão quase sempre ao longo de contatos do Grupo Riacho dos Machados com outras unidades, sugerindo posicionamento estratigráfico basal.

Leal et al. (1989), realizando mapeamentos de semi-detalhe (1:5.000), de detalhe (1:500), de trincheira e descrição de testemunhos de sondagem, individualizou quatro tipos de xistos dentro da Unidade Ouro Fino: biotita xisto, xisto quartzo-feldspático, quartzo-muscovita xisto e xistos de transição. A Figura 2.5 apresenta o mapa litológico de detalhe de parte do depósito de Riacho dos Machados.

O biotita xisto é representado por biotita-quartzo-plagioclásio/sericita xistos com granada e/ou estauroлита. Ocorrem blastos de granada, estauroлита sericitizada e às vezes cianita. Apresentam coloração cinza-esverdeado quando frescos e coloração avermelhada quando intemperizados.

O xisto quartzo-feldspático é representado por quartzo-plagioclásio-flogopita xistos. Apresentam coloração cinza quando frescos e esbranquiçada quando intemperizados.

O quartzo-muscovita xisto é formado por quartzo e muscovita em quantidades similares, representando o minério propriamente dito. Apresentam coloração branca a esverdeada quando frescos e branca a amarelada clara quando intemperizadas. Fonseca (1993) propôs que estas rochas são resultado de processos de alteração hidrotermais relacionados a uma zona de cisalhamento, que atingiu indistintamente o biotita xisto e o xisto quartzo feldspático.

Os xistos de transição são representados por quartzo-clorita/muscovita-plagioclásio-biotita xistos, onde ocorrem níveis ora cloríticos, ora muscovíticos, sendo os contatos graduais. Essas rochas marcam uma transição composicional dos biotita xistos ou xistos

quartzo-feldspáticos para os quartzo-muscovita xistos. Fonseca (1993) denominou essas rochas de milonitos cloríticos ou milonitos muscovíticos.

(B) UNIDADE CÓRREGO RODEADOR

Esta unidade encontra-se inserida tectonicamente entre a Unidade Ouro Fino e o Complexo Metamórfico Córrego do Cedro, segundo uma faixa de direção geral N20E, representando possivelmente derrames vulcânicos na base da sequência. Ela se caracteriza pela intercalação de diversas litologias, de natureza ígnea e sedimentar, tais como: titanita anfibolitos, biotita-muscovita-microclina-quartzo xistos, clorita-talco-tremolita xistos, granada-biotita-clorita xistos, carbonato-serpentina-clorita-tremolita xistos e feldspato xistos.

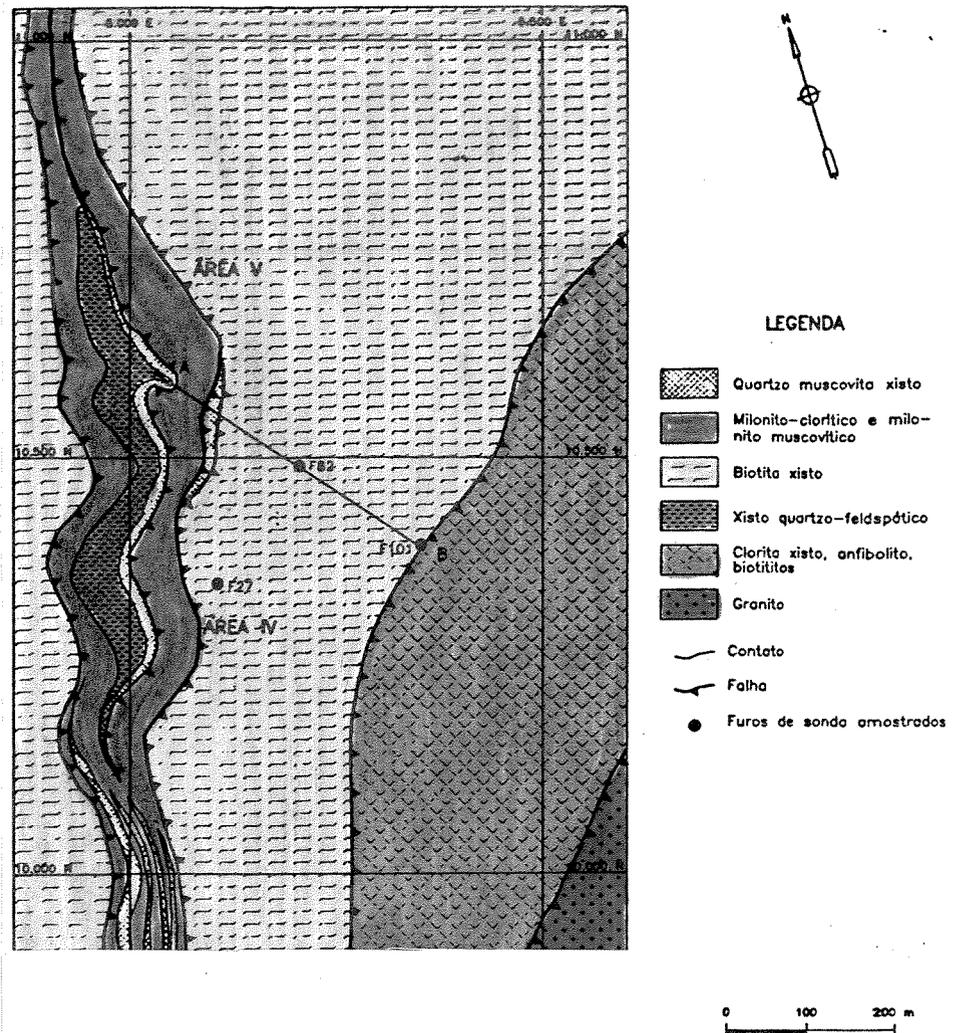


Figura 2.5 - Mapa litológico de detalhe de parte do depósito de Riacho dos Machados (Fonseca, 1993)

2.2.1.3 - SUÍTE GRANITÓIDE PEDRA DO URUBU

Esta unidade é representada basicamente por gnaisses ortoderivados, leucocráticos, de composição granítica, com uma mineralogia à base de quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e biotita. Comumente ocorrem termos porfíricos com fenocristais de plagioclásio ou feldspato potássico. Essas rochas apresentam uma xistosidade, marcada pelo alinhamento dos feldspatos, do quartzo e da biotita. O metamorfismo do fácies anfibolito é marcado por aglomerados recristalizados de feldspato (geralmente com forma sigmoidal), aglomerados de quartzo (formação de sub-grãos, novos grãos e grãos com extinção ondulante) e migmatização local. A estruturação dos minerais na xistosidade marca uma estrutura sigmoidal, configurando uma xistosidade do tipo SC. Os processos deformacionais impressos nessas rochas geram rochas que vão desde gnaisses protomilonitizados até gnaisses filonitizados.

2.2.1.4 - SUÍTE GRANITÓIDE GORUTUBA

Nesta unidade ocorrem ortognaisses leucocráticos de composição tonalítica, cuja mineralogia básica é formada por quartzo, plagioclásio, feldspato potássico e biotita. Quando o plagioclásio predomina em relação ao feldspato potássico, observa-se termos granodioríticos. Porfiroclastos de feldspatos com até 0.7 cm estão frequentemente estirados e/ou rotacionados. Observa-se ainda um bandamento nas rochas, possivelmente gerado por cisalhamento (em zonas mais deformadas praticamente não se observa o bandamento, pois os gnaisses gradaram para um quartzo-muscovita xisto). Essa unidade é correlata à Suíte Granitóide Pedra do Urubu.

2.2.1.5 - SUÍTE MONZONÍTICA PACIÊNCIA

As rochas pertencentes a esta unidade possuem composição monzonítica a quartzo-monzonítica, com fenocristais de feldspato potássico (marcando texturas porfíricas) encaixados em uma matriz constituída por quartzo, plagioclásio e aglomerados de biotita/anfibólio. Em função da mineralogia atribui-se uma composição alcalina a essas rochas. Zonas de cisalhamento transformam os minerais máficos da matriz em muscovita, que passa a envolver os pórfiros de feldspato, formando estruturas ocelares. Porém, em alguns casos, processos cataclásticos provocaram intenso fraturamento dessas rochas. Localmente, observa-se xenólitos de anfibolitos bandados do Grupo Riacho dos Machados. Outro fator muito importante é que esta unidade não foi afetada por nenhum evento

metamórfico de temperatura elevada, como é o caso do Complexo Metamórfico Córrego do Cedro, do Grupo Riacho dos Machados, da Suíte Granitóide Pedra do Urubu e da Suíte Granitóide Gorutuba.

2.2.1.6 - SUÍTE GRANÍTICA CONFISCO

Esta unidade é representada por rochas intrusivas de composição gabróica, definidas como do tipo Espinhaço. A mineralogia é constituída basicamente por quartzo, feldspato potássico e plagioclásio, além de biotita. Pode-se observar uma foliação incipiente. Ocorrem também corpos pegmatíticos a ela associados. No campo, esta unidade aflora como pequenos corpos ou mesmos diques intrusivos em outras unidades

2.2.1.7 - GRUPO MACAÚBAS

As rochas do Grupo Macaúbas marcam o limite oeste do Bloco Itacambira-Monte Azul, sendo representadas no campo por regiões mais elevadas, formando serras. Os principais tipos litológicos, reconhecidamente de origem glacial, encontrados na região são metadiamicctitos, quartzitos e metassiltitos. Os metadiamicctitos são conglomerados cuja matriz contém fragmentos angulosos e arredondados (variando de grânulos até matacões) de quartzo, quartzito, granito, gnaise, calcário, quartzo xisto e filito. Os quartzitos caracterizam-se por serem impuros, mal selecionados, feldspáticos e às vezes, ferruginosos e conglomeráticos. Localmente, observa-se quartzitos puros, com granulometria fina e estruturas sedimentares, tais como marcas de onda, estratificações cruzadas e gradação granulométrica. Os metassiltitos são rochas levemente bandadas, de coloração cinza-amarelada ou esverdeada, geralmente com uma xistosidade bem marcada.

2.2.1.8 - COBERTURAS DETRÍTICAS

Nesta unidade estão inseridos os sedimentos inconsolidados ou semi-consolidados em discordância angular e erosiva com as outras unidades descritas. Os principais sedimentos encontrados são arenitos, brechas conglomeráticas e sedimentos argilosos e silto-arenosos.

2.3 - GEOLOGIA ESTRUTURAL

A região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados apresenta uma geologia estrutural complexa, principalmente devido à superposição de eventos que atingiram as diferentes unidades. O elevado grau de intemperismo das rochas oblitera feições importantes, as quais representam muitas vezes "chaves" na compreensão do arcabouço estrutural da região. Apesar destes fatores, Rodrigues (1993) propõe que pelo menos quatro eventos deformativos atuaram na região.

O evento deformativo mais antigo da região (D_n) está associado a um bandamento gnáissico (orientação NS/N20E e mergulhos verticalizados) e migmatização das rochas pertencentes ao Complexo Metamórfico Córrego do Cedro. Essas estruturas migmatíticas e cristais de plagioclásio recristalizados apontam para uma origem dessas rochas em condições de P e T do fácies anfíbolito. Praticamente todas as estruturas geradas neste evento foram obliteradas pelos eventos seguintes.

O evento D_{n+1} desenvolveu as seguintes estruturas:

✦ dobramentos de dimensões quilométricas (visíveis em imagens de satélite e fotografias aéreas - ECOGEO (1991, 1992)) afetaram as rochas do Complexo Metamórfico Córrego do Cedro e do Grupo Riacho dos Machados. Essas dobras são apertadas com eixos sub-horizontalizados e direção entre NS e N20E. Observações de campo e análises das rochas permitem associá-las com um evento metamórfico do fácies anfíbolito.

✦ falhas de cavalgamento de alto ângulo, com orientação geral entre N10W e N20E, mergulhos variando de 45° a 70° para E, controlam os contatos entre as unidades Complexo Metamórfico Córrego do Cedro, Suíte Granitóide Pedra do Urubu, Suíte Granitóide Gorutuba e Grupo Riacho dos Machados. Essas falhas ocorrem também nas unidades e geram estruturas do tipo SC, que indicam sentido de transporte reverso ou oblíquo. Plagioclásios recristalizados envolvidos por biotita nos gnaisses e formação de quartzo-granada-estaurolita-cianita-biotita xistos no grupo Riacho dos Machados indicam paragêneses metamórficas do fácies anfíbolito. Nas unidades granitóides, essas zonas de cisalhamento formam regiões de intensa xistificação, com desenvolvimento de uma xistosidade penetrativa de direção N10W a N25E e mergulhos de 45° a 70° para NE-SE. Em afloramentos, observa-se que essa xistosidade é truncada pelos sedimentos do Grupo Macaúbas.

† falhas transcorrentes de orientação N15W a N60W e atitudes verticalizadas truncam as unidades do BIMA e algumas, por reativação, instalaram-se sobre o Grupo Macaúbas. Estima-se que o sentido de movimentação nas falhas tenha sido predominantemente sinistrais, passando a dextrais durante as reativações.

As rochas da Suite Monzonítica Paciência apresentam mineralogia e texturas ígneas bem preservadas, indicando que não foram afetadas pelos eventos até aqui descritos. Isso evidencia que nenhum evento metamórfico de fácies anfibolito atuou na área após o posicionamento desta Suite.

Nas rochas do Grupo Macaúbas pode-se observar dois eventos relacionados à tectônica brasileira. O evento D_{n+2} está diretamente ligado à extensão que propiciou a deposição do Supergrupo Espinhaço. O evento D_{n+3} está relacionado à inversão da bacia que foi imposta pela formação do cinturão da Faixa Araçuaí.

2.4 - EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

Baseado nos estudos isotópicos e geocronológicos realizados por Siga Jr. et al. (1987), nos resultados obtidos com os mapeamentos da ECOGEO (1991, 1992) e na dissertação de Fonseca (1993), Guimarães et al. (1993) propuseram o seguinte modelo de evolução geológica para a região de Riacho dos Machados:

❶ As rochas do Complexo Metamórfico Córrego do Cedro passaram por um evento metamórfico, correspondente à idade mais antiga (2.8 b.a.), encontrada por Siga Jr. et al. (1987). O principal processo deformacional relacionado a esse evento foi a formação de dobras em escala regional e de afloramento;

❷ em seguida ocorreu a deposição do Grupo Riacho dos Machados e intrusões das rochas pertencentes às Suites Graníticas Pedra do Urubu e Gorutuba;

❸ a região sofre os efeitos de um evento tectono-termal, relacionado ao Ciclo Transamazônico, que atingiu o fácies anfibolito (Fonseca, 1993). Associado a esse evento dobras reversas de alto ângulo afetaram e deslocaram as rochas do Complexo Metamórfico Córrego do Cedro, Grupo Riacho dos Machados e Suites Granitoides Pedra do Urubu e Gorutuba.

④ com o término das atividades tectono-termiais relacionadas ao Ciclo Transamazônico, ocorreu o posicionamento dos corpos graníticos da Suíte Monzonítica Paciência e da Suíte Granítica Confisco;

⑤ na região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados, segundo Guimarães et al. (1993), não existem registros seguros de uma fase extensional associada à deposição do Supergrupo Espinhaço. Além disso, não se sabe o comportamento do BIMA até a deposição do Supergrupo São Francisco. No início do Proterozóico Superior ocorreu um evento distensivo, de direção EW, com a deposição do Grupo Macaúbas, onde o Bloco Itacambira-Monte Azul (BIMA) comportou-se como um alto estrutural relativo;

⑥ após a sedimentação do Grupo Macaúbas, a Faixa Araçuaí foi envolvida por um sistema colisional associado ao Ciclo Brasileiro (Siga Jr. et al., 1987), tendo sofrido compressão e sendo as suas rochas empilhadas por cavalgamentos;

⑦ ao final do Ciclo Brasileiro, tendo cessado os esforços compressivos, falhas transcorrentes afetaram todas as unidades; durante o Mesozóico, houve o posicionamento de rochas basálticas associadas a eventos distensivos (relacionados à abertura do Atlântico).

2.5 - MINERALIZAÇÃO E ALTERAÇÃO HIDROTÉRMAL

A conceituação de zonas de cisalhamento deu um salto na década de 80 (Sibson, 1977; Ramsay & Huber, 1983). A partir daí surgiram modelos envolvendo processos simultâneos de deformação, metamorfismo, migração de fluidos e alteração hidrotermal, com deposição de ouro associada. No Brasil, a identificação de depósitos de ouro em zonas de cisalhamento redirecionaram os métodos de prospecção, com a descoberta ou ampliação de muitas jazidas, tais como: Mina de Morro Velho/MG, Vieira (1991); Rio Itapicuru/BA, Kishida et al. (1991); Gurupi/PA, Bettencourt et al. (1991); Santa Rita/GO, Olivo et al. (1991).

No Depósito de Riacho dos Machados a mineralização aurífera está associada a processos de alteração hidrotermal que atingiram as rochas (principalmente os quartzo-muscovita xistos) da Unidade Ouro Fino. A zona mineralizada, concordante com uma zona de cisalhamento de direção N20E, possui 1.700 metros ao longo do "strike" e espessura média em torno de 40 metros. A maior parte do ouro ocorre na forma de grãos muito finos (em torno de 400 mesh), preferencialmente distribuídos ao longo dos contornos do quartzo

recristalizado e como inclusões em arsenopirita. A mina a céu aberto, explorada pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), tem reservas estimadas em cerca de 3 milhões de toneladas métricas e teor médio de ouro de aproximadamente 2.2 g/t (Fonseca, 1993). A separação do ouro é feita pelo processo de lixiviação em pilhas.

Segundo Fonseca (1991, 1993) a mineralização é resultante da alteração hidrotermal (relacionada a zonas de cisalhamento) dos xistos aluminosos e xistos quartzo-feldspáticos da Unidade Ouro Fino. Esses processos hidrotermais provocaram modificações na textura, na mineralogia e geoquímica das rochas encaixantes, fruto da interação com os fluídos que percolaram ao longo das zonas de cisalhamento. Os diferentes tipos petrográficos gerados estão associados a diferentes estágios da alteração: inicial, intermediário e avançado.

ESTÁGIO INICIAL

Este estágio é representado por quartzo-biotita-plagioclásio xistos com granada, estauroлита e cianita (xistos aluminosos) e quartzo-plagioclásio-flogopita xistos (xistos quartzo feldspáticos), com paragêneses compatíveis com o fácies anfíbolito.

ESTÁGIO INTERMEDIÁRIO

As principais mudanças mineralógicas que ocorrem neste estágio são:

Xistos aluminosos:

- 1) muscovitização e cloritização da biotita, granada, estauroлита e cianita;
- 2) sericitização do plagioclásio;
- 3) epidotização de biotita, granada e plagioclásio.
- 4) as mudanças anteriormente descritas são acompanhadas da formação de quartzo, pirita, arsenopirita, turmalina e rutilo.

Quartzo-oligoclásio xistos:

- 1) não ocorre cloritização;
- 2) microclinização do oligoclásio;
- 3) muscovitização/sericitização parcial do oligoclásio, microclina e flogopita.

ESTÁGIO AVANÇADO

Este estágio é caracterizado por uma transformação total de todos os minerais, resultando em um quartzo-muscovita xisto (com sulfetos) em ambos os tipos litológicos. Ressalta-se que no quartzo-muscovita xisto originado do quartzo-oligoclásio xisto a quantidade desses sulfetos é bastante inferior quando comparada aos xistos aluminosos. O ouro apresenta o mesmo comportamento dos sulfetos. As mudanças mineralógicas, com enriquecimento de K_2O , SiO_2 , S, B, CO_2 , Au, As e remoção de Mg, Ca e Fe indicam hidratação (evolução do fluido para condições de pH mais elevado, favorável à solubilidade de Au-S-complexos). A liberação de H^+ em algumas reações propicia a diminuição do pH, facilitando a precipitação do Au.

CAPÍTULO 3

PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT/TM

3.1 - INTRODUÇÃO

Técnicas de processamento digital aplicadas de forma adequada a imagens LANDSAT/TM têm obtido sucesso em trabalhos de mapeamento lito-estrutural e de prospecção mineral, principalmente na identificação de minerais de alteração hidrotermal associados a mineralizações de ouro. Isso é devido às resoluções espacial e espectral dessas imagens e por elas serem as únicas, entre os sensores orbitais disponíveis no momento, que possuem bandas em regiões do espectro eletromagnético onde minerais de alteração apresentam feições diagnósticas. Entretanto, em áreas de clima tropical e subtropical, como na maior parte do Brasil, este tipo de aplicação é ainda limitado, por causa do forte intemperismo das rochas e pela presença de algum tipo de cobertura vegetal. Esta limitação é agravada pelos padrões de ocupação humana, devidos principalmente a atividades agrícolas, que podem mascarar feições de interesse nas imagens. Nesses casos, a aplicação de técnicas apropriadas de processamento de imagem pode ajudar a remover as barreiras e realçar a informação geológica contida nas imagens. Quando comparado com os métodos convencionais de exploração geológica, o uso dessas técnicas tem conseguido reduzir os custos e o tempo de pesquisa.

Neste estudo foram aplicadas técnicas convencionais de processamento digital de imagem (PDI), abordadas na literatura, seja na forma de livros (Drury, 1987, 1989; Mather, 1987; Sabins, 1987; Crósta, 1992) ou apostilas (Meneses et al., 1991; Paradella, 1990). Em função do vasto acervo disponível, os aspectos teóricos envolvendo imagens digitais e técnicas de PDI serão apresentados de forma sintética ou em anexo (Anexo 1).

As imagens usadas neste estudo foram adquiridas pelo LANDSAT 5 em 28 de agosto de 1985, na órbita/ponto 218.72 (WRS). Escolheu-se o mês de agosto por ser um período seco, cuja estiagem propicia que as imagens não tenham praticamente problemas com coberturas de nuvens e a cobertura vegetal não seja tão densa.

O tratamento dos dados LANDSAT/TM foi dividido em técnicas para realce litológico (seleção de atributos, composições coloridas, razão e subtração de bandas, análise por principais componentes e decorrelação), técnicas para realce estrutural (filtros direcionais e iluminação em tempo real) e técnicas para realce de minerais de alteração (subtração de bandas e análise por principais componentes). Em função desses objetivos, selecionou-se para este trabalho apenas as bandas do TM situadas em regiões do espectro eletromagnético da porção refletida, ou seja, excluiu-se a banda 6 (banda termal).

3.2 - DADOS ESTATÍSTICOS

Os aspectos estatísticos de uma imagem consistem basicamente no cálculo dos valores mínimos e máximos de DN, a média, o desvio padrão, a matriz de correlação, a matriz de variância e a matriz de autovetores.

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores de DN mínimos e máximos, a média e o desvio padrão para todas as bandas do LANDSAT/TM utilizadas neste estudo:

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
DN MÍNIMO	19	11	9	2	1	1
DN MÁXIMO	255	135	107	119	219	138
MÉDIA	48.7	22.0	24.7	47.4	71.6	21.2
DESVIO PADRÃO	5.3	4.4	8.7	8.7	22.6	10.1

Tabela 3.1 - Valores de DN, média e desvio padrão para a imagem de Riacho dos Machados

* as bandas 4, 5 e 7 possuem os menores valores de DN mínimo e as bandas 1, 2 e 3 apresentam valores maiores. Isto se deve a que os efeitos de espalhamento atmosférico atingem de forma mais intensa as bandas da região visível do espectro eletromagnético, adicionando valores de DN;

* a banda 1 é a que apresenta o maior valor de DN máximo, provavelmente em grande parte devido a presença de ruídos, pois através de uma estimativa a partir do histograma original podemos supor que o valor de DN máximo real para essa banda esteja

em torno de 103. As outras bandas também sofrem este problema de interferência de ruídos.

* a maior média é encontrada na banda 5 e a menor na banda 7, indicando que a banda 5 é a mais clara e a banda 7 a mais escura;

* o desvio padrão mostra que a banda 2 é aquela com menor quantidade de informação e a banda 5 é a banda com maior quantidade de informação.

As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, os valores da matriz de correlação e os valores da matriz de variância-covariância, calculados através da função de geração de estatística do ER-Mapper.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
BANDA 1	1.000					
BANDA 2	0.915	1.000				
BANDA 3	0.911	0.959	1.000			
BANDA 4	0.049	0.126	0.077	1.000		
BANDA 5	0.829	0.852	0.872	0.154	1.000	
BANDA 7	0.853	0.882	0.909	0.047	0.947	1.000

Tabela 3.2 - Matriz de correlação

A Tabela 3.2 mostra que as bandas 2 e 3 apresentam a maior correlação entre si e que as bandas 4 e 7 a menor correlação entre si. Além disso, com excessão da banda 4, as demais são altamente correlacionadas.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
BANDA 1	28.252					
BANDA 2	21.602	19.709				
BANDA 3	42.155	37.053	75.722			
BANDA 4	2.294	4.899	5.886	76.473		
BANDA 5	99.805	85.726	171.925	30.453	513.411	
BANDA 7	47.187	40.748	82.373	4.281	223.410	108.370

Tabela 3.3 - Matriz de variância-covariância

Na Tabela 3.3, a raiz quadrada dos valores correspondentes localizados na diagonal da matriz de variância-covariância representa o desvio padrão de uma banda, ou seja, a banda 5 possui maior variância. As bandas 5 e 7 formam o par com maior variância.

Tendo avaliado o comportamento das bandas originais, efetuou-se o corte da imagem original com dimensões de 1024x1024 pixels, de forma a cobrir grande parte da área mapeada pela ECOGEO (1991). A imagem resultante possui dimensões aproximadas de 413x413 pixels, cobrindo uma área no terreno de aproximadamente 154 km².

3.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO

Dados de sensoriamento remoto comumente apresentam imperfeições, geradas principalmente por problemas de calibração dos detetores, mal funcionamento do sensor, problemas com a transmissão, recepção e registro da informação, efeitos atmosféricos e distorções causadas por oscilações da plataforma (Meneses et al., 1991). As principais correções dessas imperfeições, conhecidas como pré-processamento, são correções geométricas, atmosféricas e radiométricas. A não aplicação dessas correções faz com que as imperfeições sejam também realçadas quando forem aplicados os realces nas imagens.

Neste estudo foi necessário efetuar-se somente as correções geométrica e atmosférica. Logo, os aspectos teóricos envolvendo as correções radiométricas e sua aplicação não serão abordados.

a) CORREÇÃO GEOMÉTRICA

As imagens digitais não possuem precisão cartográfica, dificultando a apresentação das mesmas na forma de um mapa. Torna-se então necessário, corrigi-las, baseado em algum sistema de coordenadas, para que elas passem a ter os atributos de escala e projeção de um mapa. Este procedimento é conhecido como Correção Geométrica.

O método utilizado neste estudo consistiu em se determinar a relação entre o sistema de coordenadas do mapa e da imagem, através da definição de pontos de controle no terreno (GCP - *Ground Control Points*), identificados tanto no mapa quanto na imagem. Esses GCPs geralmente são feições de fácil identificação, tais como intersecção de estradas, limites de regiões agrícolas, pistas de pouso, intersecção de drenagens e outros.

A base do método consiste em estabelecer as diferenças de posicionamento de alguns pontos na imagem e no mapa. Com base nessas diferenças, a distorção presente na imagem pode ser estimada e uma transformação espacial aplicada. A precisão do método está relacionada ao posicionamento dos GCPs, feito de forma interativa pelo usuário, e pela disponibilidade de um mapa confiável em uma escala compatível com as imagens, pois os GCPs terão que ser visualizados tanto na imagem como no mapa.

Os GCPs são definidos na imagem através de um "zoom" no local a ser posicionado o ponto e em um sistema de coordenadas compatível com o da imagem (linha e coluna). Na imagem LANDSAT/TM original (antes do corte da área específica de trabalho), com dimensões de 1024x1024 pixels, foram identificados 27 GCPs (o procedimento exige geralmente um mínimo de 6 pontos em uma imagem 1000x1000), sendo descartados 7 pontos com erro considerado alto (recomenda-se que esse erro não ultrapasse 1 pixel). Este erro está associado à imprecisão gerada pelos ajustes entre os pontos de controle do mapa e da imagem. O erro médio acumulado obtido foi de 24 metros. O posicionamento na imagem dos 20 GCPs selecionados para a correção geométrica é mostrado na Figura 3.1.

As coordenadas geográficas dos GCPs (Tabela 3.4) foram extraídas em mesa digitalizadora a partir das cartas 1:100.000 editadas pelo IBGE, quadriculas Janaúba (SE-23-Z-D-IV) e Francisco Sá (SE-23-X-B-I).

GCPs	Coordenadas E-W	Coordenadas N-S
PONTO 1	705701	8210414
PONTO 2	707364	8208839
PONTO 3	708233	8218669
PONTO 4	711969	8219229
PONTO 5	706421	8220507
PONTO 6	710126	8223277
PONTO 7	712690	8222140
PONTO 8	708832	8232485
PONTO 9	705848	8232589
PONTO 10	696892	8212707
PONTO 11	697656	8208238
PONTO 12	685313	8211808
PONTO 13	685968	8216813
PONTO 14	689997	8218160
PONTO 15	689009	8224120
PONTO 16	698042	8222565
PONTO 17	690699	8235609
PONTO 18	694142	8234659
PONTO 19	695940	8231911
PONTO 20	702748	8230924

Tabela 3.4 - Coordenadas Geográficas dos GCPs

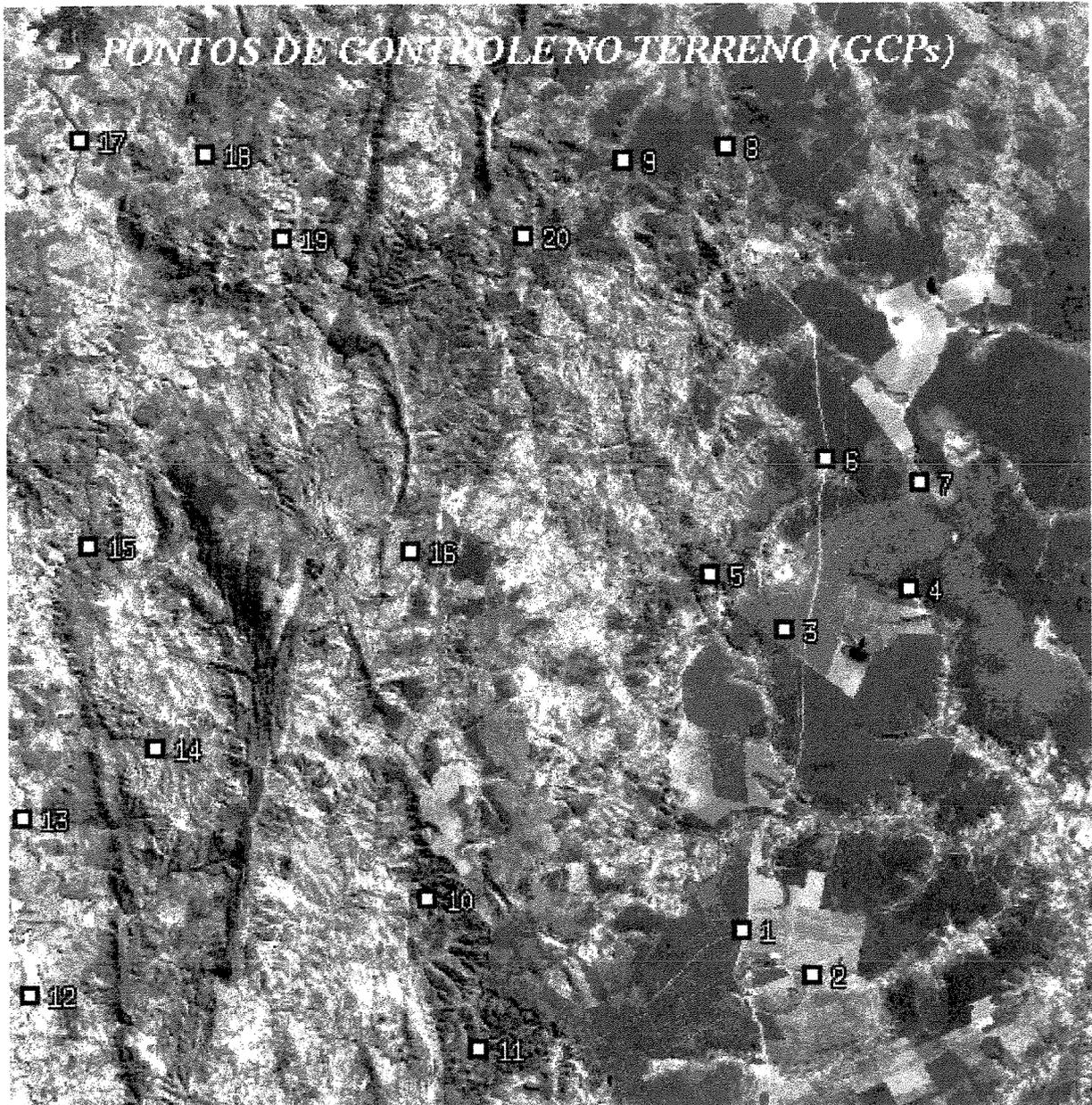


Figura 3.1 - GCPs definidos para a imagem de Riacho dos Machados (1024x1024 pixels)

Uma vez definidos os pontos de controle, o programa efetua a transformação de coordenadas, podendo-se utilizar um polinômio linear, quadrático ou cúbico. Neste estudo as correções das distorções existentes entre a imagem e o mapa foram feitas utilizando-se um polinômio linear. Entretanto, como os pixels da imagem corrigida não correspondem espacialmente aos pixels da imagem original, torna-se necessário uma interpolação dos valores de nível de cinza mais próximos da imagem original. Os métodos de interpolação são variados (Tabela 3.5), tendo sido utilizado o Método do Vizinho Próximo, pois é rápido e melhor preserva o valor de nível de cinza do pixel original.

Terminada a correção, a imagem gerada tem as coordenadas compatíveis com as bases cartográficas e geológicas existentes.

MÉTODO	TÉCNICA	TEMPO RELATIVO DE COMPUTAÇÃO	VANTAGENS	DESvantagens
VIZINHO PRÓXIMO	TRANFERE O DN DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	1	SIMPLES DE COMPUTAR; MANTÉM O DN ORIGINAL	IMAGEM POUCA ESTÉTICA
INTERPOLAÇÃO BI-LINEAR	CALCULA A MÉDIA PONDERADA DOS 4 VIZINHOS	10	IMAGEM SUAVE; GEOMETRICAMENTE CORRETA	ALTERA O DN DO PIXEL ORIGINAL
CONVOLUÇÃO CÚBICA	UTILIZA UMA MÉDIA DOS 16 VIZINHOS PRÓXIMOS	20	IMAGEM ESTETICAMENTE MELHOR	COMPLEXA DE CALCULAR

Tabela 3.5 - Métodos de interpolação (modificada de Crósta, 1992)

b) CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

A atmosfera afeta dados obtidos por sensores remotos de duas formas (Taranik, 1978): subtrai valores à resposta original (absorção atmosférica) e adiciona valores à resposta original (espalhamento atmosférico). Mather (1987) mostra como esses efeitos atmosféricos aumentam inversamente ao comprimento de onda, ou seja, as bandas do visível sofrem uma influência maior da atmosfera do que as bandas do infra-vermelho. Consequentemente, antes de se realizar alguns tipos de processamento, como a razão entre bandas, esse efeito precisa ser removido, para que o resultado represente realmente a relação de reflectância entre os pixels das duas bandas.

Dentre os vários métodos de correção atmosférica disponíveis, escolheu-se o Método de Subtração do Pixel Escuro, proposto por Chavez (1975). Neste método, estima-se que corpos de água desprovidos de sedimentos em suspensão tenham valores de DN próximos a zero no IR.

Na área de estudo foram encontradas algumas lagoas razoavelmente profundas, de águas razoavelmente desprovidas de sedimentos em suspensão, e os valores de DN para as bandas 1, 2, 3, 4 e 5 foram obtidos em função de pontos onde o valor de DN da banda 7 é zero. Ressalta-se que os valores de DN para cada banda foram obtidos a partir de 10 medidas realizadas, adotado-se o menor valor obtido como o resultado aproximado para definição dos valores de DN a serem posteriormente subtraídos de cada banda original (Tabela 3.6).

BANDAS	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
DNs	38	12	9	4	1	0

Tabela 3.6 - Valores de DN devido ao efeito atmosférico encontrados em cada banda.

A correção atmosférica foi realizada apenas nas bandas a serem aplicadas a técnica de divisão de bandas, cujas imagens resultantes não apresentaram sombreamento topográfico (caso os valores subtraídos de cada banda não estejam próximos do valor real a ser subtraído, as imagens resultantes da divisão irão apresentar sombreamento topográfico).

3.4 - AUMENTO DE CONTRASTE

As imagens LANDSAT/TM apresentam uma resolução radiométrica de 256 níveis de cinza, podendo variar de 0 (preto) a branco (255). Entretanto, a informação captada por cada canal frequentemente está concentrada em uma pequena faixa do intervalo de níveis de cinza possível (histogramas com pouco espalhamento), gerando imagens com pouco contraste. A aplicação de técnicas de aumento de contraste permite que o olho humano perceba melhor as diferenças radiométricas de uma determinada imagem (o sistema visual humano consegue discriminar cerca de 30 tons de cinza, desde que estejam bem espalhados), constituindo-se numa poderosa e bastante usada técnica de realce em sensoriamento remoto.

As técnicas de aumento de contraste usadas compreenderam: aumento linear de contraste e aumento de contraste balanceado (BCET), esta última desenvolvida por Liu (1991). O primeiro foi aplicado nas imagens cujos produtos finais seriam apresentados em níveis de cinza e o segundo foi aplicado em todas as imagens apresentadas na forma de composições coloridas.

O aumento linear de contraste preserva o formato do histograma original, porém gera uma imagem cujo histograma apresentará valor médio e espalhamento diferentes. Esse tipo de aumento foi usado após a aplicação de filtros direcionais e pseudo-iluminação/azimute para melhor distribuição dos níveis de cinza e conseqüentemente uma melhor visualização da imagem. O maior problema com esse tipo de aumento de contraste consiste nos limites a serem estabelecidos para se aplicar o contraste, pois pode-se estar perdendo informação (Crósta, 1992).

O Aumento de Contraste Balanceado (BCET) consiste basicamente na obtenção de uma curva de transferência de contraste que se aproxime de uma reta. Matematicamente, a técnica é implementada por uma função parabólica ou cúbica. A Figura 3.2 apresenta, como exemplo, as curvas de transferência produzidas com a aplicação da técnica BCET nas imagens da região de Fortaleza de Minas (MG) realizadas por Crósta (1990).

A técnica BCET permite um controle dos valores de DN mínimos e máximos, da média e dos valores mínimos e máximos de corte. Além disso, preserva o formato original do histograma, evitando perda de informação. A restrição deste tipo de contraste é que nem todos os "softwares" de processamento de imagens possuem a função correspondente em suas bibliotecas. Para este trabalho, utilizou-se a função BCET contida na biblioteca do ER-Mapper.

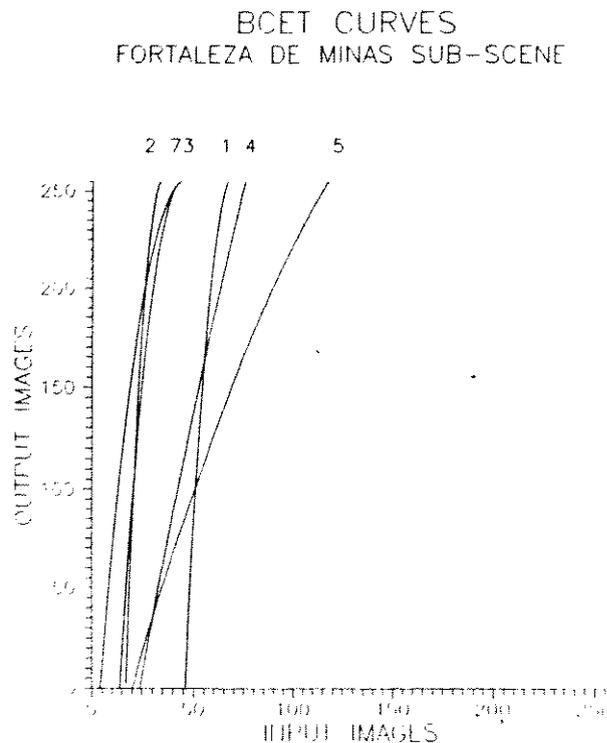


Figura 3.2 - Curvas BCET obtidas para a região de Fortaleza de Minas (Crósta, 1990)

3.5 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS AO MAPEAMENTO LITOLÓGICO

As técnicas usadas para realçar e melhorar a visualização das informações litológicas foram: seleção de atributos, composições coloridas, operações aritméticas (razão e subtração de bandas), análise por principais componentes e aumento de contraste por decorrelação.

A interpretação das imagens produtos foi baseada no mapa geológico confeccionado pela ECOGEO (1991). Para facilitar a análise, foi gerado um mapa litológico (Figura 3.3) e gerada uma transparência desse mapa para facilitar a visualização das diversas litologias na imagem (essa transparência se encontra na contra-capá).

3.5.1 - SELEÇÃO DE ATRIBUTOS

Em Sensoriamento Remoto existe uma relação direta entre os canais selecionados para a composição colorida e o resultado obtido na interpretação visual. Para garantir que a interpretação final seja baseada na informação contida em todos os canais disponíveis, o ideal seria analisar todas as combinações de canais possíveis. Porém, isso se torna impraticável pelo longo tempo necessário para gerar as composições coloridas e para fazer a análise visual das imagens.

A técnica de seleção de atributos é uma alternativa pela qual se obtém, a partir do conjunto de bandas multiespectrais originais, a seleção de subconjuntos que detenham o maior volume de informação. Por ser baseada em dados estatísticos interbandas, espera-se que ela auxilie o intérprete no processo subjetivo de seleção de bandas. Ressalta-se que esta técnica não deve ser adotada como norma geral, devendo ser utilizada apenas como orientação na escolha das bandas a serem trabalhadas, uma vez que ela se baseia apenas em parâmetros quantitativos (estatísticos) da cena, e não leva em consideração quaisquer parâmetros qualitativos.

O LANDSAT/TM adquire imagens em seis bandas na porção refletida do espectro eletromagnético (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7). Grande parte da informação espectral é redundante, devido à correlação interbandas. Essas imagens permitem 20 permutações possíveis, para confecção de composições coloridas com três bandas. Partindo-se destes 20 subconjuntos, existem muitos caminhos para selecionar triplete de bandas. Neste estudo foi aplicado o Método do "Optimum Index Factor" (OIF), definido por Chavez (1982).

CENOZOICO

 COBERTURAS DETRITO-LATERITICAS

GRUPO MACAÚBAS

 FILTOS

 META-PARACONGLOMERADOS POLIMITICOS - QUARTZITOS

GRUPO RIACHO DOS MACHADOS

 UNIDADE OURO FINO
ANFIBOLITOS FINOS

 UNIDADE OURO FINO
XISTOS PARA-DEBRADOS

 UNIDADE CORREGO RODEADOR
INTERCALAÇÃO DE DIVERSAS LITOLOGIAS DE NATUREZA IGNEA E SEDIMENTAR

COMPLEXO METAMORFICO CORREGO DO CEDRO

 GNAISSES LEUCOCRATICOS DE COMPOSICAO GRANITICA

SUITE GRANITOIDE PEDRA DO URUBU

 GNAISSES ORTOGIBRADOES LEUCOCRATICOS DE COMPOSICAO GRANITICA

INTRUSIVAS

 SUITE GRANITICA CONFISCO
ROCHAS GRANITICAS E ROCHAS QUARTZO FELDSPÁTICAS

 SUITE MONZONITICA PACIENCIA
ROCHAS ALCALINAS DE COMPOSICAO MONZONITICA

 META-BASICAS

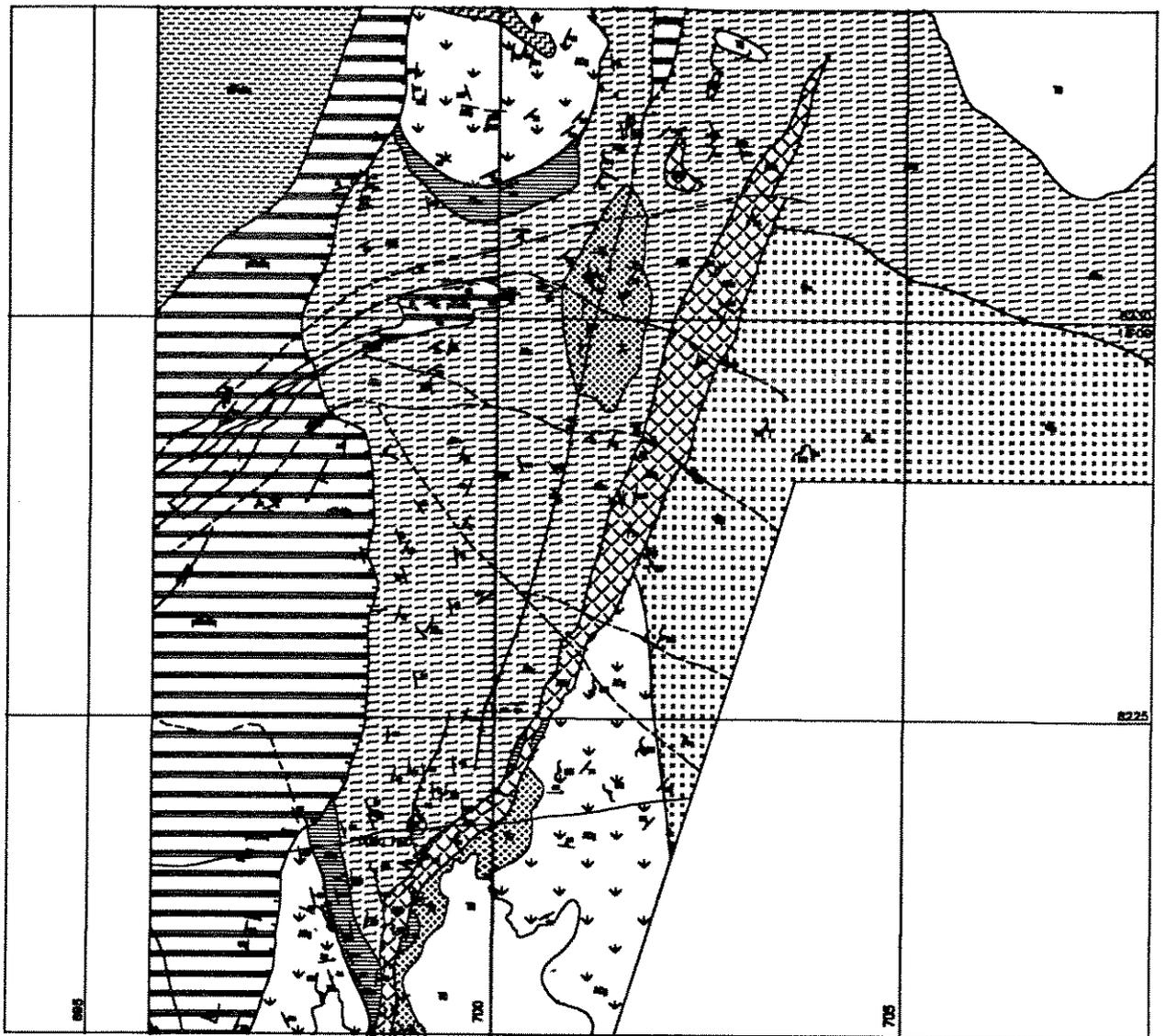


Figura 3.3 - Mapa litológico da área de trabalho com as imagens LANDSAT/TM

MÉTODO DO "OPTIMUM INDEX FACTOR" - OIF

Este método consiste em avaliar a quantidade de informação contida em cada banda, usando os respectivos desvios-padrão e os coeficientes de correlação, os quais representam o grau de correlação interbanda. O OIF é calculado partindo-se de três canais quaisquer, dividindo-se o desvio padrão total pela correlação interbanda total:

$$OIF_{(abc)} = \frac{\Sigma(Da+Db+Dc)}{\Sigma(Cab+Cac+Cbc)},$$

onde a, b e c são três bandas quaisquer; D é o desvio padrão e C é o coeficiente de correlação.

Teoricamente, os OIFs com valores mais altos representam os tripleteos com maior quantidade de informação.

A Tabela 3.7 apresenta todas as permutações e respectivos OIFs.

PERMUTAÇÕES	ΣD	ΣC	OIF	RANKING
345	40.106	1.103	36.361	01
457	41.544	1.148	36.188	02
145	36.719	1.032	35.580	03
245	35.843	1.132	31.663	04
347	27.587	1.033	26.706	05
147	24.200	0.949	26.554	06
247	23.324	1.055	22.108	07
134	22.762	1.037	21.950	08
234	21.886	1.162	18.835	09
124	18.499	1.090	16.972	10
357	41.501	2.728	15.213	11
157	38.114	2.629	14.498	12
135	36.676	2.612	14.041	13
257	37.238	2.681	13.890	14
235	35.800	2.683	13.343	15
125	32.413	2.596	12.486	16
137	24.157	2.673	9.037	17
237	23.281	2.750	8.466	18
127	19.894	2.650	7.507	19
123	18.456	2.785	6.627	20

Tabela 3.7 - OIFs para imagens LANDSAT/TM da área do Depósito de Riacho dos Machados

A análise das imagens na área do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados mostra que os tripletes com maiores OIFs foram TM3/TM4/TM5 e TM4/TM5/TM7. Por outro lado, os tripletes com menores OIFs foram TM1/TM2/TM3 e TM1/TM2/TM7. Todas as combinações possíveis foram analisadas visualmente, buscando avaliar a validade do método. A conclusão é que o Método do OIF apresenta bons resultados.

3.5.2 - COMPOSIÇÃO COLORIDA

A informação espectral contida em três bandas diferentes pode ser sintetizada em uma única imagem colorida, usando a técnica de composição colorida. Esta técnica é extremamente útil, uma vez que o olho humano pode discriminar aproximadamente 2-3 milhões de cores (Crósta, 1992). Além disso, as cores em cada composição colorida são função da reflectância dos materiais superficiais nas bandas usadas e da alocação de cores para os canais de saída vermelho, verde e azul (RGB).

Neste estudo os tripletes com melhor *ranking* na Tabela 3.7 (seleção de atributos) foram selecionados para composição colorida e análise visual: TM3/TM4/TM5 e TM4/TM5/TM7. Selecionou-se também a composição TM1/TM2/TM7, pelo critério de identificação visual das principais litologias. Essas imagens foram pré-processadas para obter o melhor contraste para cada banda e melhor distribuição de cores na composição RGB, usando a técnica de Aumento de Contraste Balanceado (BCET), definida por Liu (1991). A alocação de cores foi feita interativamente, baseada no contraste espectral entre diferentes litologias.

Para a composição TM3/TM4/TM5, a melhor alocação de cores foi TM3 no vermelho, TM5 no verde e TM4 no azul (Figura 3.4). Nessa composição as rochas pertencentes ao Complexo Metamórfico Córrego do Cedro, que afloram na porção leste da imagem, ocorrem em tonalidades brancas. Regiões com resposta espectral parecida ocorrem dentro do Grupo Macaúbas, porém o contexto litológico permite uma interpretação segura de que apesar da resposta espectral semelhante, tratam-se de litologias diferentes. Observa-se que as rochas do Complexo Metamórfico Córrego do Cedro estão também presentes como pequenas faixas dentro da Suíte Granitóide Pedra do Urubu, que na imagem aparece na porção leste com tons verde-amarelados. No Grupo Riacho dos Machados os anfibólitos da base da Unidade Ouro Fino e a Unidade Córrego Rodeador não se mostraram diferenciáveis nesta composição colorida, onde o Depósito de Riacho dos Machados apresenta-se com coloração branca, algumas regiões com intensa cascalheira de quartzo

apresentam-se com coloração avermelhada e as demais regiões representam as áreas em azul da imagem, devido à presença de cobertura vegetal. As Coberturas devido à presença de vegetação apresentam resposta espectral semelhante, aparecendo também em azul. As Suítes Paciência e Confisco apresentam a mesma resposta espectral, ocorrendo como áreas verde-oliva e verde-claro, aparecendo principalmente na porção norte da área. Os limites do Grupo Macaúbas são representados por serras constituídas por quartzitos que geram regiões de sombreamento topográfico e que facilitam a identificação das rochas pertencentes à esse grupo. Essas feições são de fácil visualização na porção norte da área e no contato do Grupo Macaúbas com o Grupo Riacho dos Machados. Regiões do grupo Macaúbas onde não ocorrem os quartzitos, e portanto menos íngremes, ocorrem com tonalidades verde-amarelas muito parecidas com as tonalidades encontradas nas rochas da Suíte Pedra do Urubu.

Na composição TM4/TM5/TM7, com alocação de cores tendo TM4 no vermelho, TM5 no verde e TM7 no azul (Figura 3.5) os contrastes entre o Complexo Metamórfico Córrego do Cedro (observados na imagem com tonalidades claras) e a Suíte Pedra do Urubu (observados com tonalidades verde-azuladas) são melhor visualizados nesta composição. Os quartzitos pertencentes ao Grupo Macaúbas são também mais facilmente identificados, principalmente as ocorrências à norte em tons escuros. O Grupo Riacho dos Machados e as Coberturas aparecem principalmente com coloração avermelhada, devido à resposta da cobertura vegetal.

Finalmente, usou-se uma composição colorida TM1/TM2/TM7 com TM1 no vermelho, TM2 no verde e TM7 no azul (Figura 3.6). Esta composição foi selecionada por realçar as rochas pertencentes à Unidade Ouro Fino (Grupo Riacho dos Machados) e as rochas pertencentes às Suítes Paciência e Confisco. Essas rochas aparecem com tonalidades azuladas e, quando comparadas com os mapas geológicos disponíveis, permitem individualizar melhor essas unidades. As demais unidades apresentam respostas melhores nas outras duas composições coloridas anteriormente apresentadas.

3.5.3 - RAZÃO E SUBTRAÇÃO DE BANDAS

As operações aritméticas entre bandas permitem que duas ou mais imagens sejam combinadas em uma única imagem através de uma operação matemática, realizada sempre pixel a pixel. Essa técnica é muito utilizada, pois quando direcionada para realce de determinado material em superfície, reduz a dimensionalidade dos dados originais, porém com perda de informação.

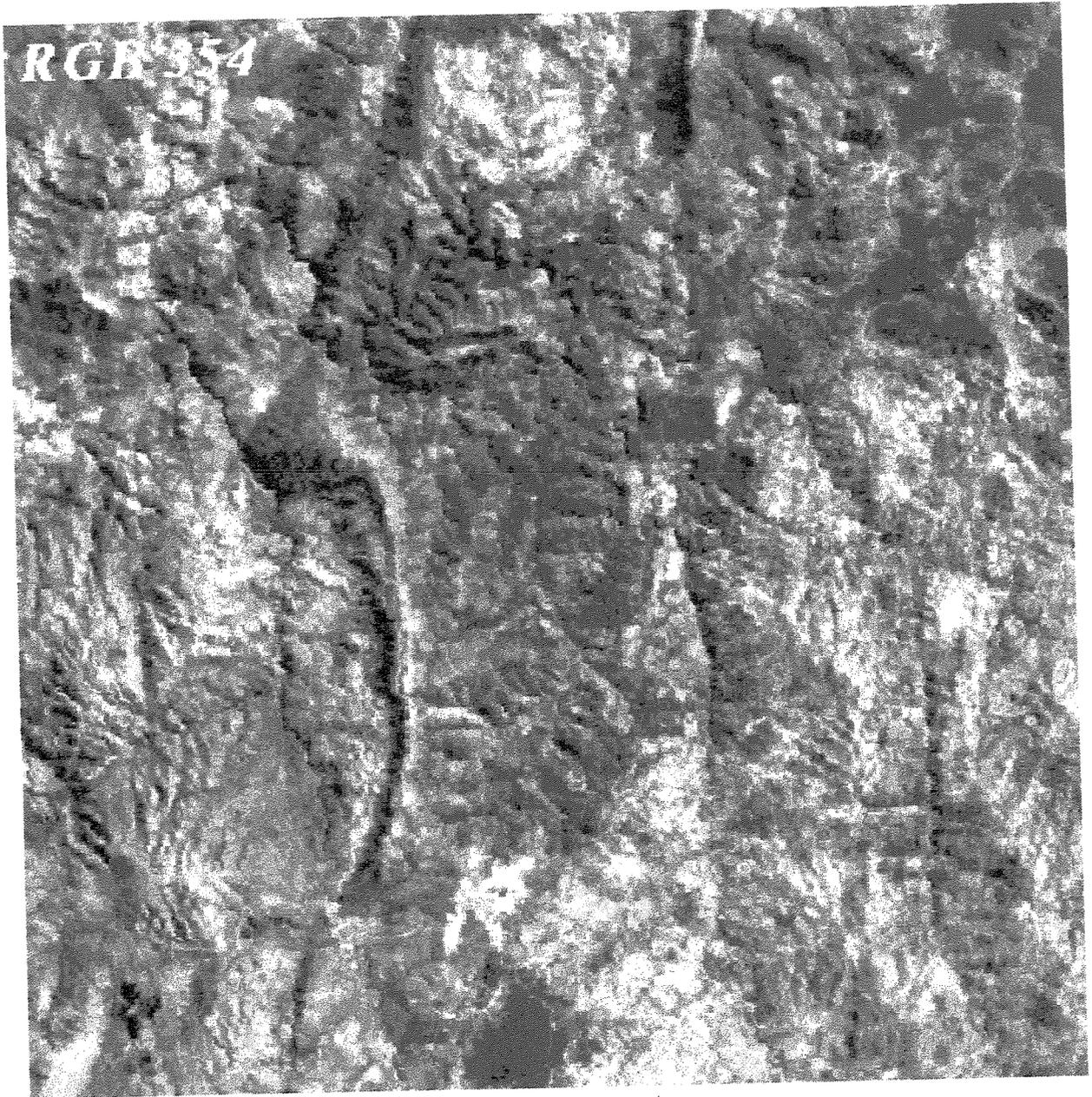


Figura 3.4 - Composição colorida TM3/TM5/TM4 (RGB) usando aumento de contraste BCET

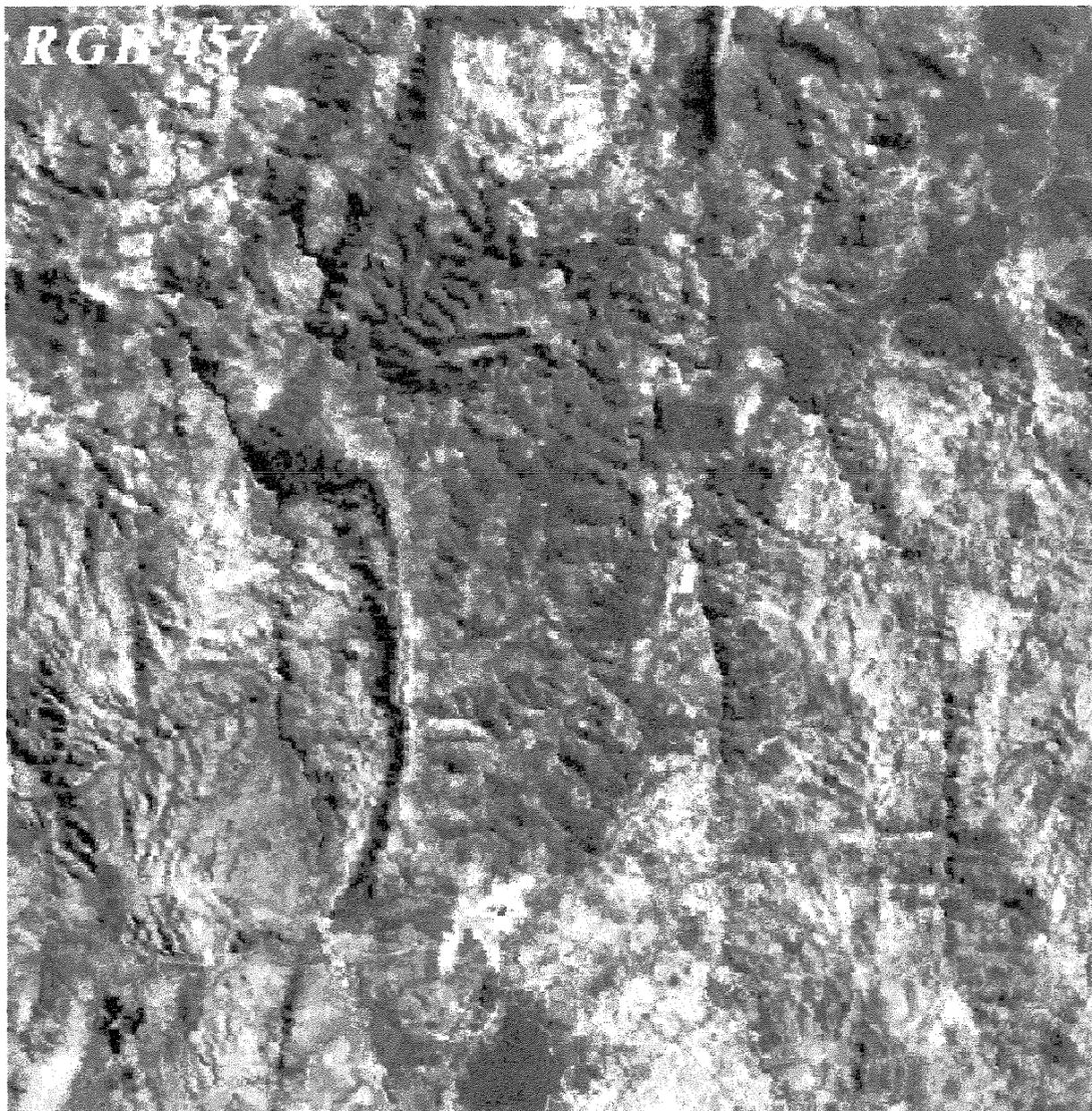


Figura 3.5 - Composição colorida TM4/TM5/TM7 (RGB) usando aumento de contraste BCET

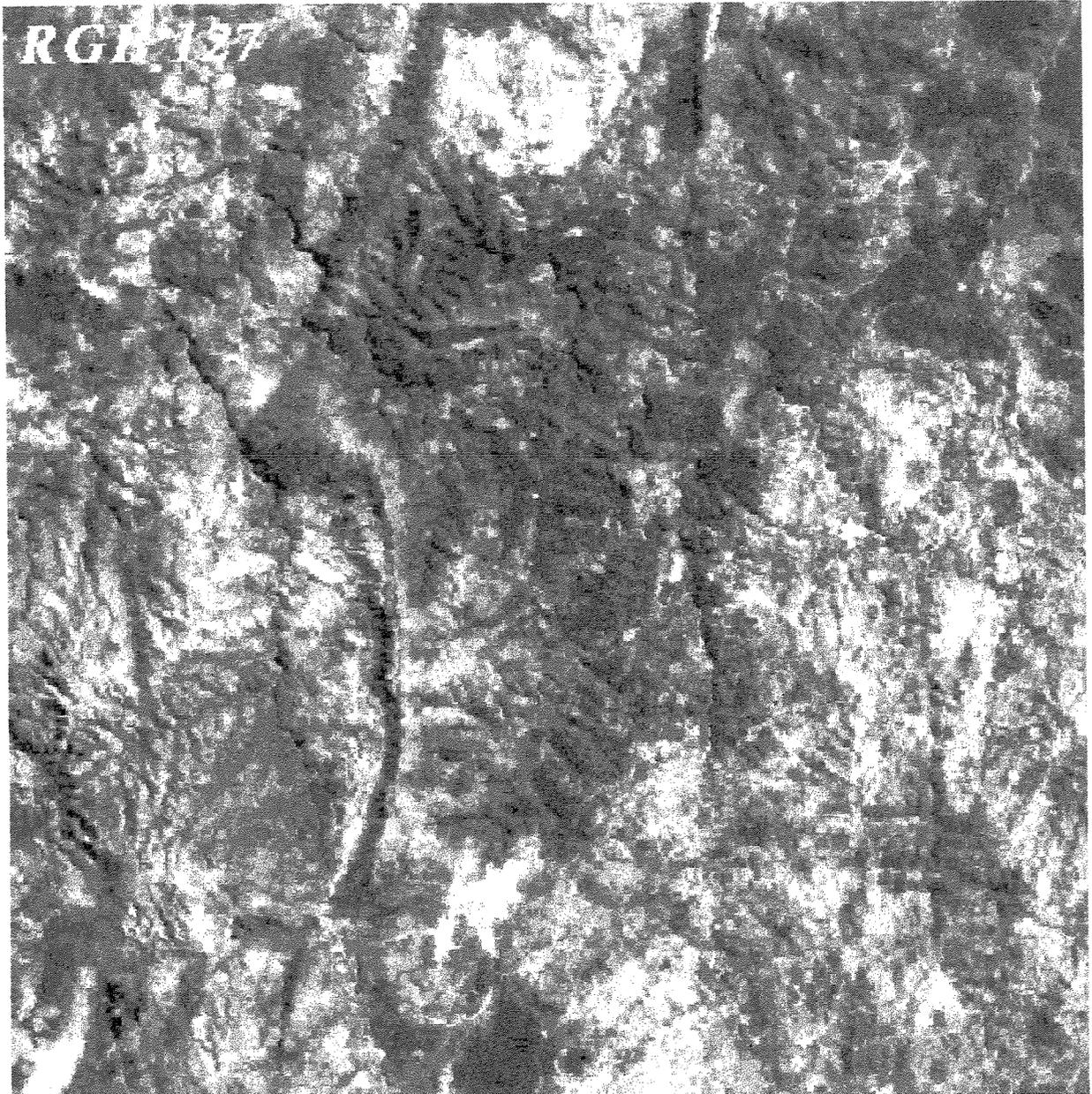


Figura 3.6 - Composição colorida TM1/TM2/TM7 (RGB) usando aumento de contraste BCET

Neste estudo foram utilizadas operações de razão e subtração de bandas para realce da resposta espectral de óxidos/hidróxidos de ferro e minerais contendo hidroxila presentes na superfície e associados a rochas e solos aflorantes na área. Também foi testada a interferência espectral da vegetação. Conseqüentemente, analisando o comportamento espectral desses materiais, selecionou-se as bandas TM1 e TM3 para mapear óxidos/hidróxidos de ferro, bandas TM5 e TM7 para mapear minerais contendo hidroxila e, finalmente, as bandas TM3 e TM4 para ocorrência de vegetação.

Antes de se realizar as operações foi realizado um pré-processamento dos dados:

✦ **correção atmosférica:** realizada antes de se efetuar a razão de bandas para evitar problemas com o espalhamento atmosférico. O método usado foi o de subtração do pixel escuro (Chavez, 1975), abordado no item 3.3b;

✦ **BCET:** aplicado antes de se efetuar a subtração de bandas, produzindo duas novas imagens com a mesma média e mesmo desvio padrão. O aumento de contraste BCET (Crósta, 1990; Liu, 1991) foi abordado no item 3.4.

Toda a informação foi agrupada em duas composições coloridas, uma contendo as razões TM3/TM1, TM5/TM7 e TM4/TM3 (Figura 3.7), e uma outra com as subtrações TM3-TM1, TM5-TM7 e TM4-TM3 (Figura 3.8). Em ambas os conjuntos foi aplicado filtro passa baixa de mediana para eliminação dos ruídos e conseqüentemente, os produtos gerados são imagens suavizadas.

A composição colorida TM3/TM1, TM5/TM7 e TM4/TM3 em RGB não realça muito bem os contrastes litológicos entre as diversas unidades presentes na área de estudo. Na porção norte da imagem as regiões mais avermelhadas nessa composição, quando checadas no campo, permitiram a identificação de rochas pertencentes à Suíte Paciência e Confisco. Porém, algumas regiões de cobertura apresentaram a mesma resposta, assim como muitas regiões do Grupo Macaúbas com maiores teores de óxidos de ferro no solo. No Grupo Riacho dos Machados, algumas regiões vermelhas estão associadas à Unidade Córrego Rodeador, principalmente aquelas próximas ao contato com as unidades Complexo Córrego do Cedro e Suíte Pedra do Urubu (coloração verde-amarronzado na porção leste da imagem). Finalmente, esta imagem não realça muito bem o Grupo Macaúbas, principalmente porque elimina o sombreamento topográfico, que caracteriza, do ponto de vista geomorfológico, as litologias resistentes à erosão dessa unidade. As regiões azuladas na imagem, principalmente associadas ao Grupo Riacho dos Machados e Coberturas, representam as porções da imagem com cobertura vegetal.

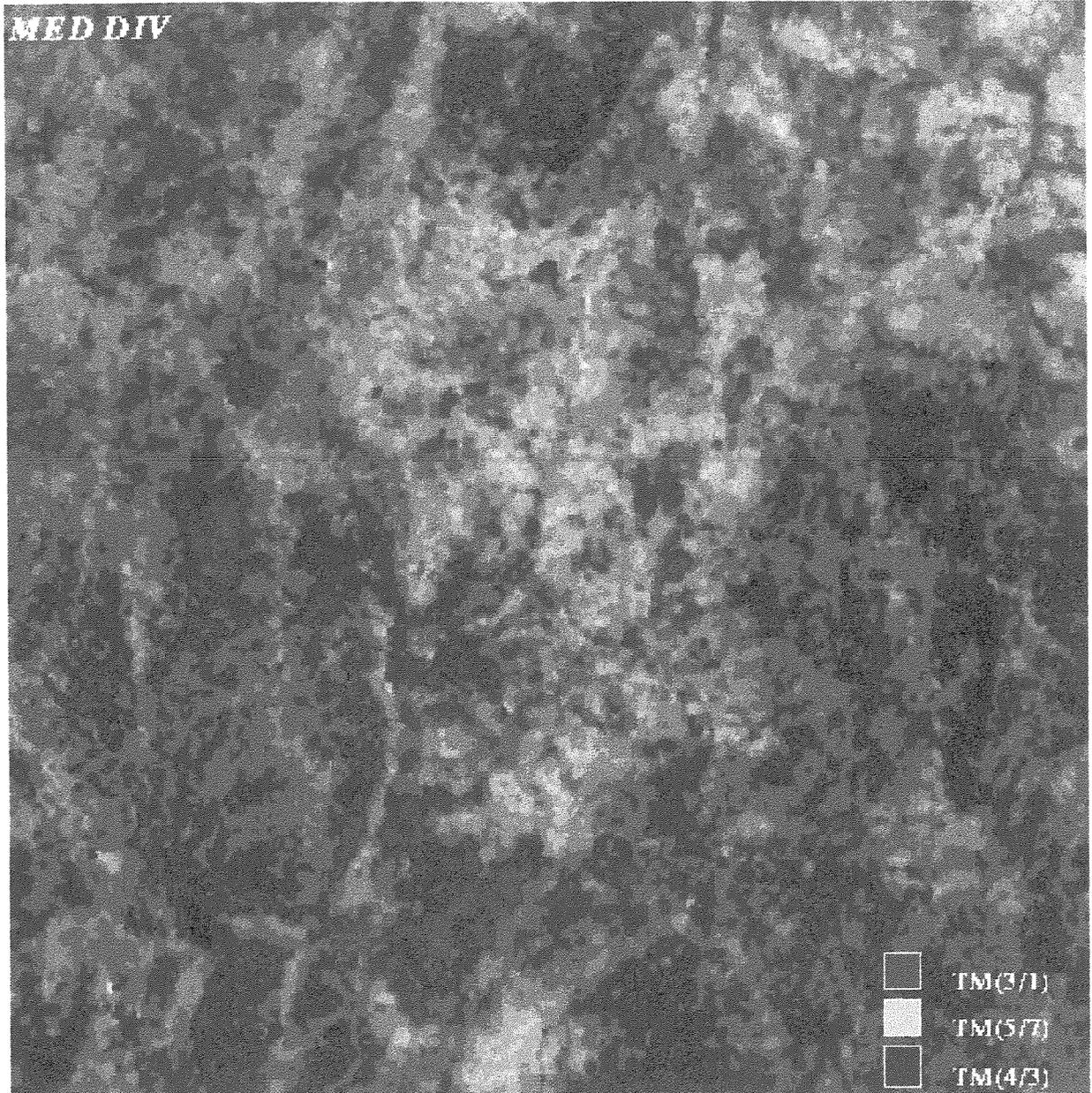


Figura 3.7 - Composição colorida TM3/TM1, TM5/TM7 e TM4/TM3 (RGB)

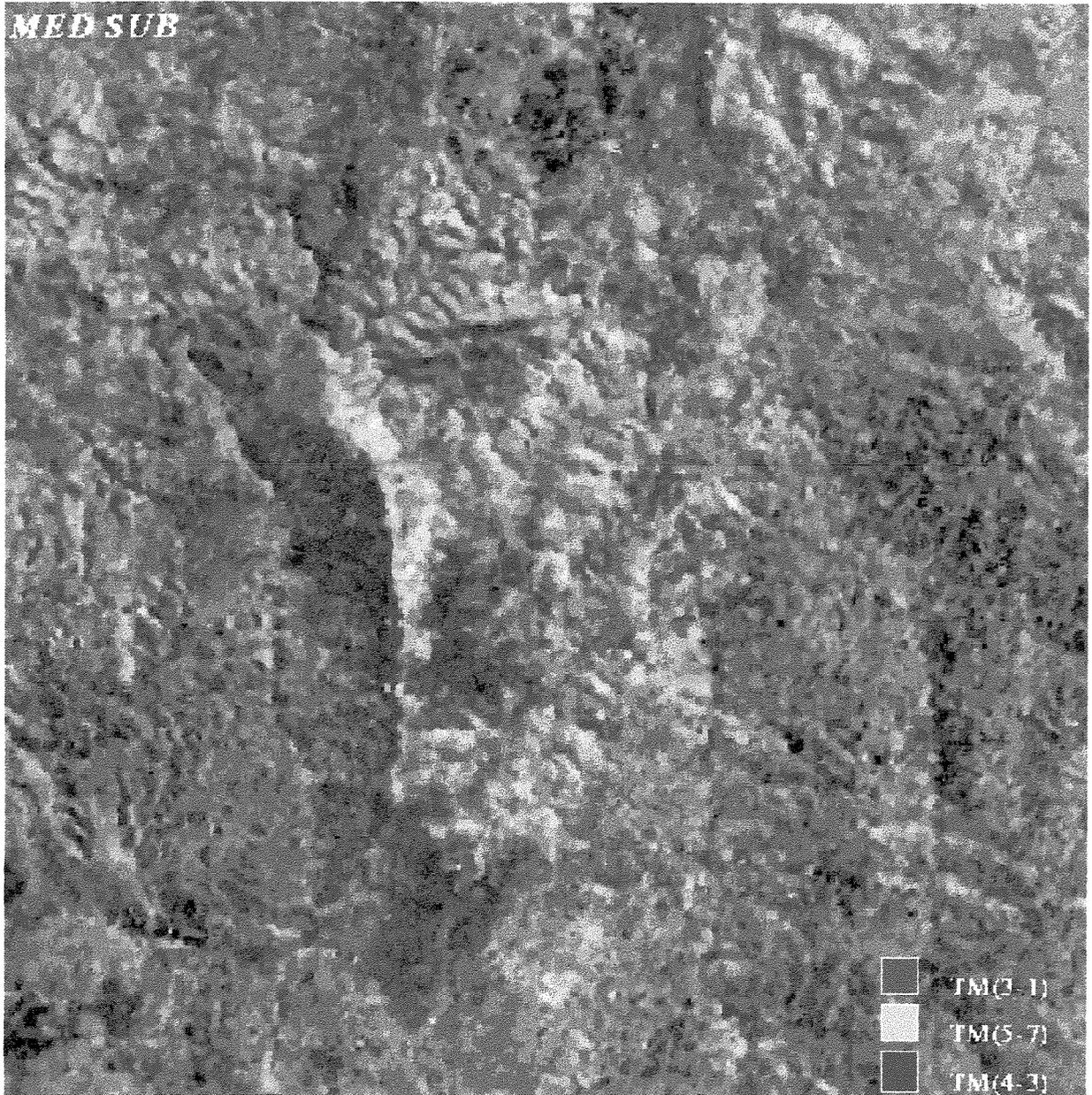


Figura 3.8 - Composição colorida TM3-TM1, TM5-TM7 e TM4-TM3 (RGB)

A imagem TM3-TM1, TM5-TM7 e TM4-TM3 obteve resultados melhores que a divisão de bandas. As rochas pertencentes ao Complexo Córrego do Cedro e Suíte Pedra do Urubu ocorrem como um verde escuro intenso (porção leste da imagem) mostrando pela primeira vez um contraste nítido com o Grupo Macaúbas, que ocorre como um verde pardo (porção oeste da imagem). As Suítes Paciência e Confisco apresentam-se como regiões vermelhas, porém sendo observados os mesmos problemas que ocorreram com a divisão de bandas. Os quartzitos pertencentes ao Grupo Macaúbas em algumas regiões são bem cartografados e em outras muito mal, não tendo uma cor característica nesta imagem. Da mesma forma que na divisão de bandas, as regiões com cobertura vegetal apresentam coloração azulada na imagem.

3.5.4 - PRINCIPAIS COMPONENTES

Apesar das dificuldades envolvidas na interpretação das composições coloridas formadas por imagens de Principais Componentes (as cores das bandas originais não têm uma relação direta com as cores das PCs), esta técnica tem sido frequentemente usada no mapeamento geológico. A importância desta técnica está no fato dela remover a correlação entre os dados originais, criando um novo conjunto de bandas sem correlação entre si. Outra característica importante desta técnica é que ela concentra grande parte da informação na primeira PC (PC1), que decresce em direção às PCs de ordem mais alta.

Os resultados obtidos com a análise por componentes principais foram representados em duas composições coloridas: a primeira contém a maior parte da informação, compreendendo as PC1, PC2 e PC3 (Figura 3.9); a segunda, formada pelas PC4, PC5 e PC6 (Figura 3.10), contém grande quantidade de ruídos, porém informação litológica útil. Esses ruídos foram minimizados com a aplicação de filtros de mediana nas PCs 5 e 6.

Na imagem formada pelas PC1, PC2 e PC3 as rochas do Complexo Córrego do Cedro podem ser diferenciadas das rochas pertencentes à Suíte Intrusiva Pedra do Urubu, aparecendo a primeira unidade com tons mais róseos/roxos claros e a segunda unidade com tons de roxo escuro a avermelhado. Novamente observa-se que as rochas do Grupo Macaúbas apresentam resposta espectral semelhante. O Grupo Riacho dos Machados e as Coberturas aparecem em tons de verde em função da vegetação. Os quartzitos do Grupo Macaúbas podem ser facilmente visualizados com tons azul escuro. Porém, regiões mais silicificadas apresentam a mesma resposta, reforçando o fato de que o conhecimento

geológico da área é fundamental no processo de interpretação. As Suítes Paciência e Confisco não são bem identificadas nesta composição.

A imagem formada pelas PC4, PC5 e PC6 apesar de conter muito pouca informação, permite visualizar bem as rochas pertencentes à unidade Córrego do Cedro, que aparecem na imagem com tons azul escuro muito fortes, chegando quase a preto. Ressalta-se que neste caso, não se observa comportamento semelhante nas rochas do Grupo Macaúbas, fato que quase sempre ocorria nas outras técnicas.

3.5.5 - DECORRELAÇÃO

A técnica de realce por decorrelação foi aplicada para melhorar a distribuição das cores nos tripletes de bandas. Originada a partir da Análise por Principais Componentes, esta técnica remove a correlação interbanda de um dado triplete, mantendo o mesmo espaço de cores das bandas originais.

Selecionou-se para aplicação desta técnica dois tripletes: O primeiro constituído pelas bandas TM1/TM2/TM7 e o segundo por TM1/TM5/TM4, Os produtos finais foram denominados respectivamente de DCL 127 (Figura 3.11) e DCL 154 (Figura 3.12).

A imagem DCL 127 mostra as rochas do Complexo Córrego do Cedro em tons variando de amarelo a branco, que muitas vezes se confundem com regiões mais silicificadas presentes no Grupo Riacho dos Machados e no Grupo Macaúbas. As rochas pertencentes à Suíte Pedra do Urubu apresentam uma coloração variando de vermelho a roxo, muito semelhante a regiões do Grupo Macaúbas. As Suítes Paciência e Confisco são muito bem identificadas nesta imagem, que em azul destaca essas rochas ricas em óxidos de ferro. Observa-se inclusive, na porção sul da imagem, a base da Unidade Ouro Fino, cujos anfibolitos aparecem com a mesma resposta espectral que as Suítes Paciência e Confisco. Regiões com cobertura vegetal e os quartzitos do Grupo Macaúbas ocorrem com coloração esverdeada.

A imagem DCL 154 foi gerada para exemplificar que tripletes com baixa correlação também podem dar bons resultados com a aplicação desta técnica, apesar dos resultados das imagem DCL 127 serem muitos melhores que o da imagem DCL 154 para diferenciação litológica.

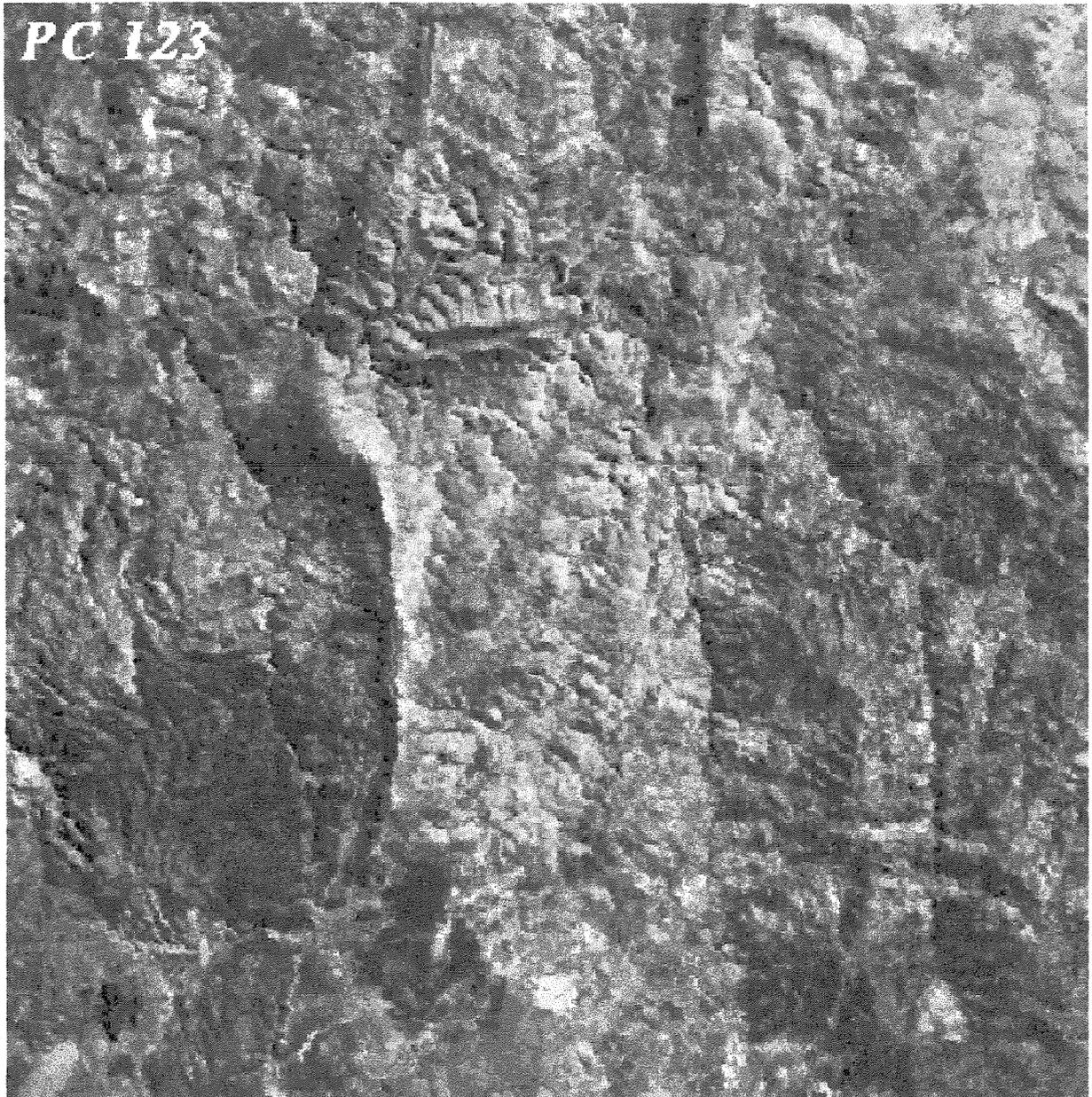


Figura 3.9 - Composição colorida PC1, PC2 e PC3 (RGB)

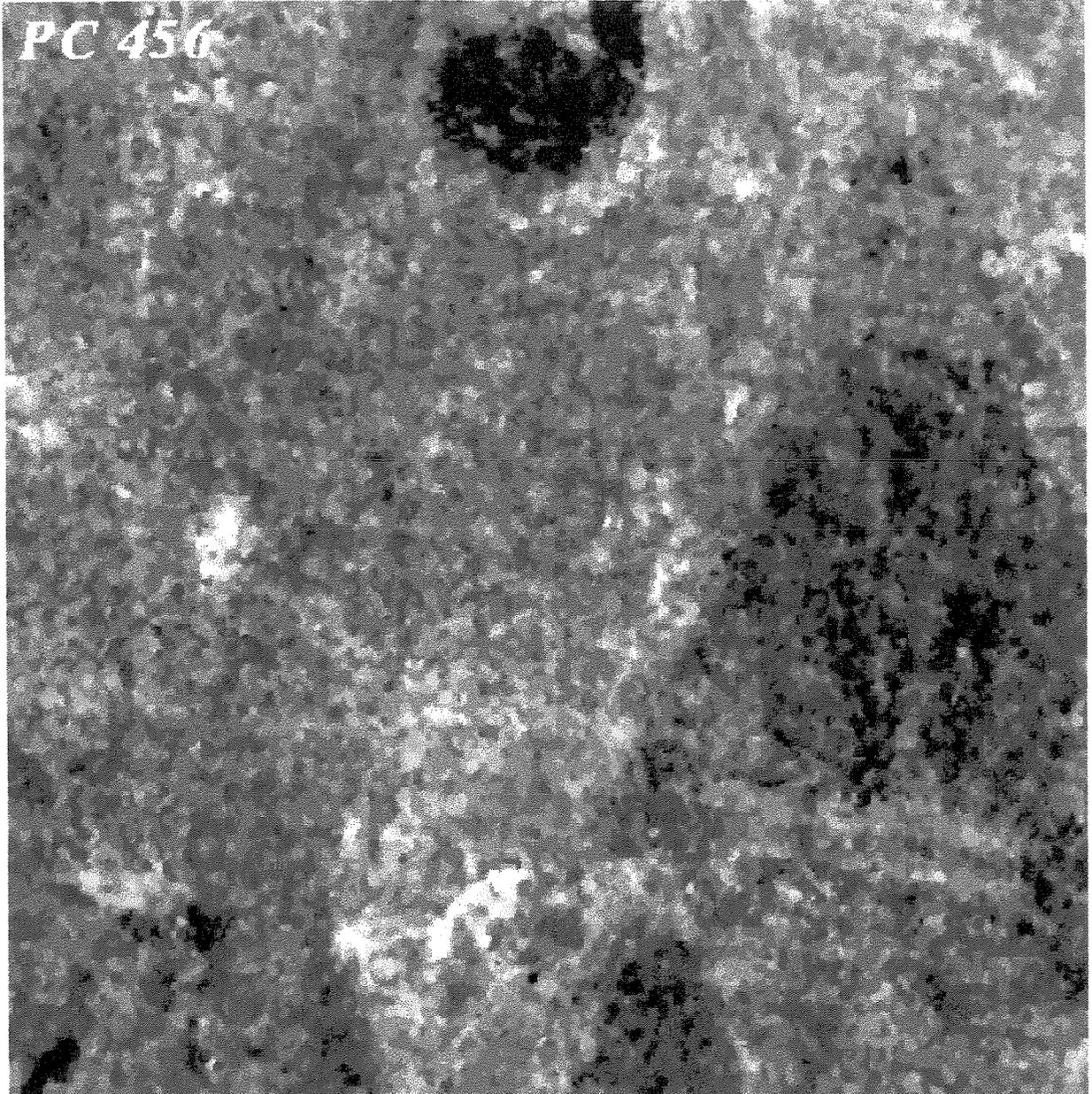


Figura 3.10 - Composição colorida PC4, PC5 e PC6 (RGB)

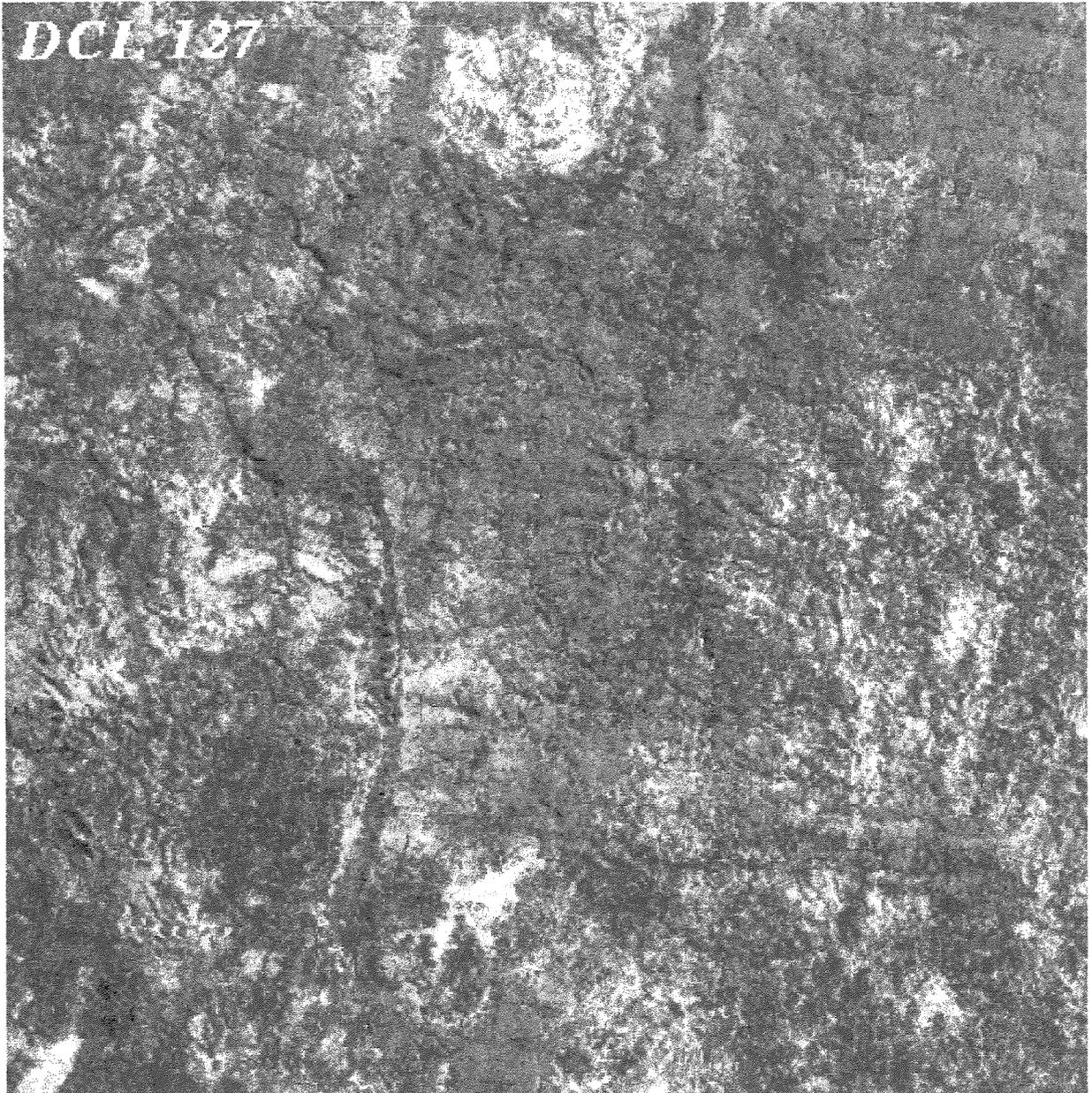


Figura 3.11 - Decorrelação aplicada em TM1/TM2/TM7 - DCL 127 (RGB)

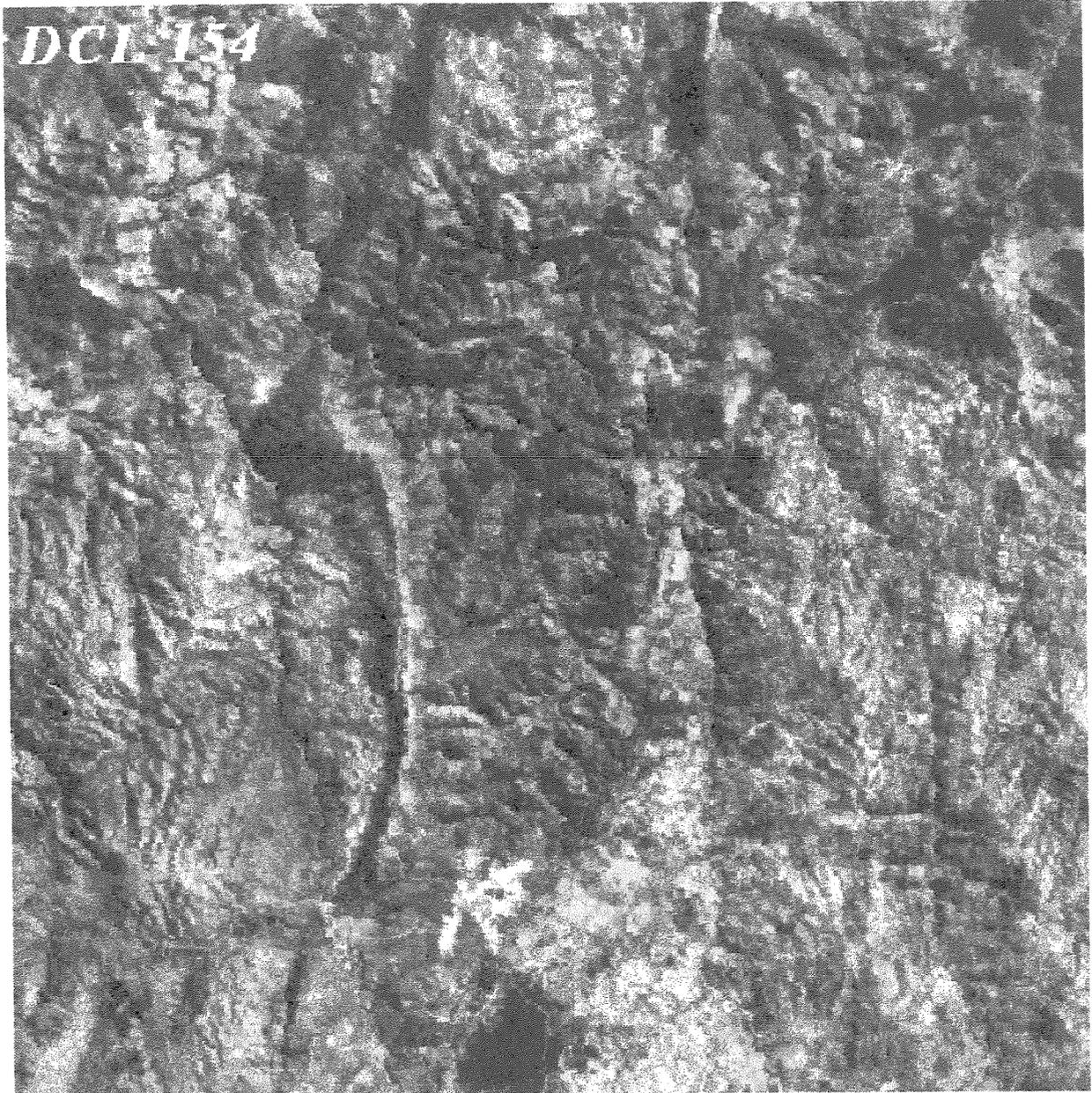


Figura 3.12 - Decorrelação aplicada em TM1/TM5/TM4 - DCL 154 (RGB)

3.5.6 - RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos com o processamento digital de imagens para discriminação litológica são apresentados na Tabela 3.8, mostrando a performance de cada técnica. A performance foi definida como muito boa, boa, razoável e pobre. Apesar das dificuldades encontradas para se relacionar algumas das cores vistas nas composições coloridas com as unidades litológicas, foi possível associar muitas vezes as cores obtidas com litologias presentes na área. Um controle de campo mais detalhado, em áreas selecionadas, poderá ser feito no futuro para resolver este problema, fugindo no entanto do escopo deste trabalho.

		RGB354	RGB457	RGB127	RAZÃO	SUB	PC123	PC456	DCL127	DCL154
COMPLEXO Córrego do Cedro		boa	muito boa	razoável	pobre	pobre	boa	boa	muito boa	pobre
GRUPO R. DOS MACHADOS	OURO FINO	pobre	pobre	boa	pobre	pobre	pobre	pobre	boa	razoável
	C. RODEAD.	pobre	pobre	boa	boa	pobre	pobre	razoável	boa	boa
SUÍTE PEDRA DO URUBU		razoável	boa	pobre	pobre	boa	boa	pobre	razoável	pobre
SUÍTE PACIÊNCIA		razoável	pobre	muito boa	boa	boa	razoável	razoável	muito boa	muito boa
SUÍTE CONFISCO		razoável	pobre	muito boa	boa	boa	razoável	razoável	muito boa	muito boa
GRUPO MACAÚBAS		boa	muito boa	boa	pobre	pobre	muito boa	pobre	pobre	muito boa
COBERTURAS		pobre	razoável	razoável	pobre	pobre	pobre	pobre	pobre	razoável

Tabela 3.8 - Performance de cada técnica na discriminação litológica

3.6 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS AO MAPEAMENTO ESTRUTURAL

As técnicas para realce estrutural consistiram na aplicação de filtros de convolução direcionais e iluminação em tempo real (gerando azimuth e iluminação artificiais). Essas técnicas foram usadas para realçar padrões de drenagem e de relevo, os quais estão geralmente associados a feições estruturais que ocorrem em subsuperfície.

O passo inicial consistiu em extrair os principais lineamentos que pudessem ser observados nas bandas originais. Com base nos lineamentos extraídos e no arcabouço estrutural da região, foram aplicados os filtros direcionais e iluminação em tempo real.

3.6.1 - FILTROS DIRECIONAIS

Os filtros passa-alta se caracterizam por eliminar feições de baixa frequência presente nas imagens, deixando somente as feições de alta frequência. Dentre os diferentes tipos de filtros passa-altas, os filtros direcionais constituem-se em um tipo especial (Crósta, 1992), pois permitem realçar bordas em direções pré-determinadas. Porém, deve-se ter muito cuidado na interpretação, pois comumente os filtros direcionais geram artefatos (bordas artificiais).

Nos filtros direcionais os pesos são distribuídos assimetricamente ao redor de um eixo hipotético, sendo as direções a serem realçadas paralelas à esse eixo hipotético. O realce se dá num intervalo de 45° para ambos os lados em relação a direção de realce (Crósta, 1992).

Neste estudo foram utilizados filtros direcionais conhecidos como Filtros de Sobel de direção de iluminação NE-SW (realce de estruturas NW-SE) e NW-SE (realce de estruturas NE-SW), dimensões 3X3 e pesos mostrados na Figura 3.13. Esses filtros foram aplicados na banda 4 e na PC1.

FILTRO NE-SW	à	à	FILTRO NW-SE
0 -1 -1			-1 -1 0
1 0 -1			-1 0 1
1 1 0			0 1 1

Figura 3.13 - Filtros direcionais aplicados na TM4 e PC1

As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam a imagem resultante da aplicação de filtro direcional NE-SW nas imagens TM4 e PC1, respectivamente. Esses filtros foram aplicados para realçar as estruturas NW-SE. Similarmente, as Figuras 3.16 e 3.17 apresentam a imagem resultante da aplicação de filtro direcional NW-SE nas imagens TM4 e PC1, respectivamente. Sendo esses filtros aplicados para realce de lineamentos com direção NE-SW.

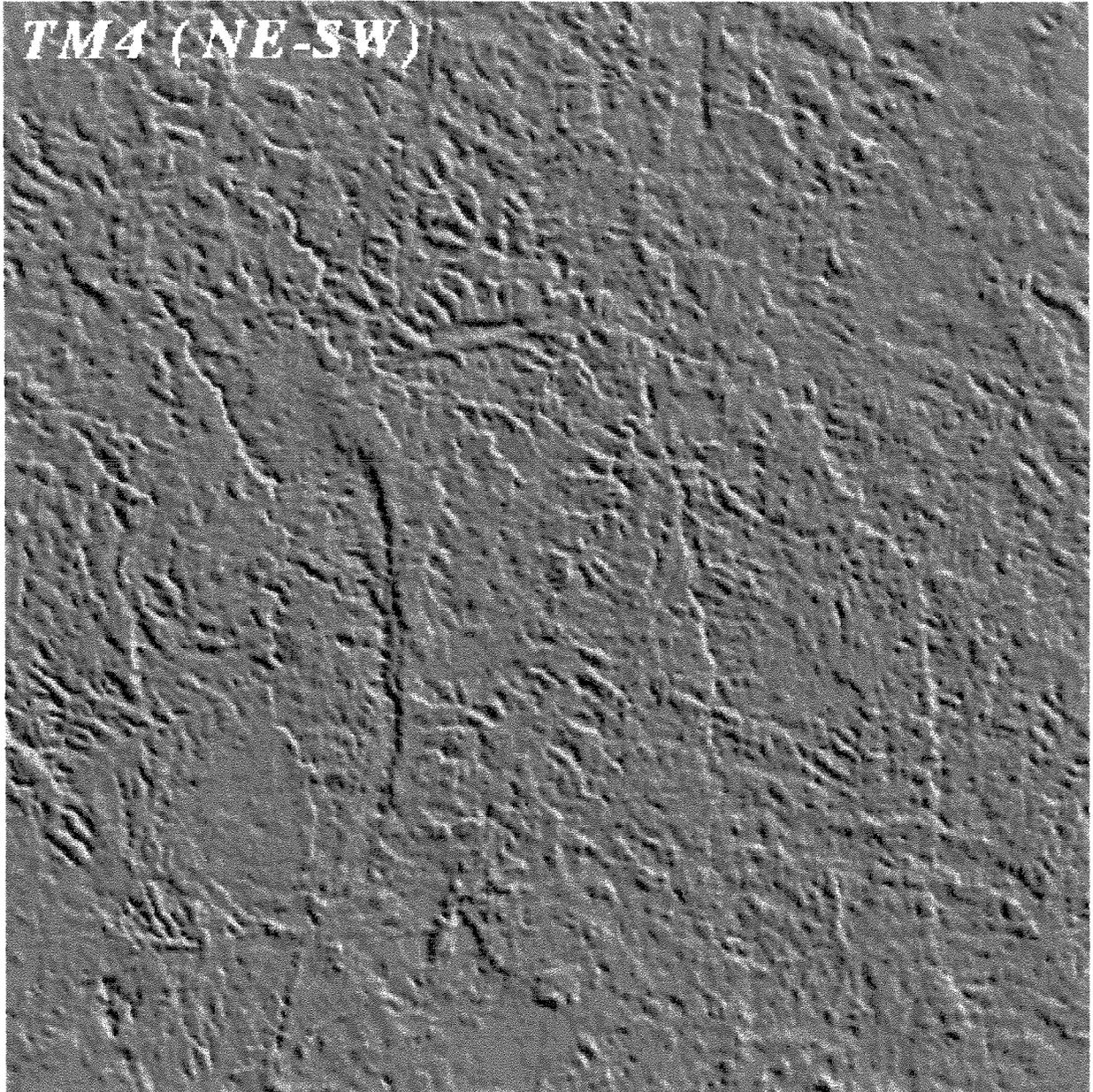


Figura 3.14 - Filtro direcional NE-SW aplicado na imagem TM4 para realce de estruturas NW-SE

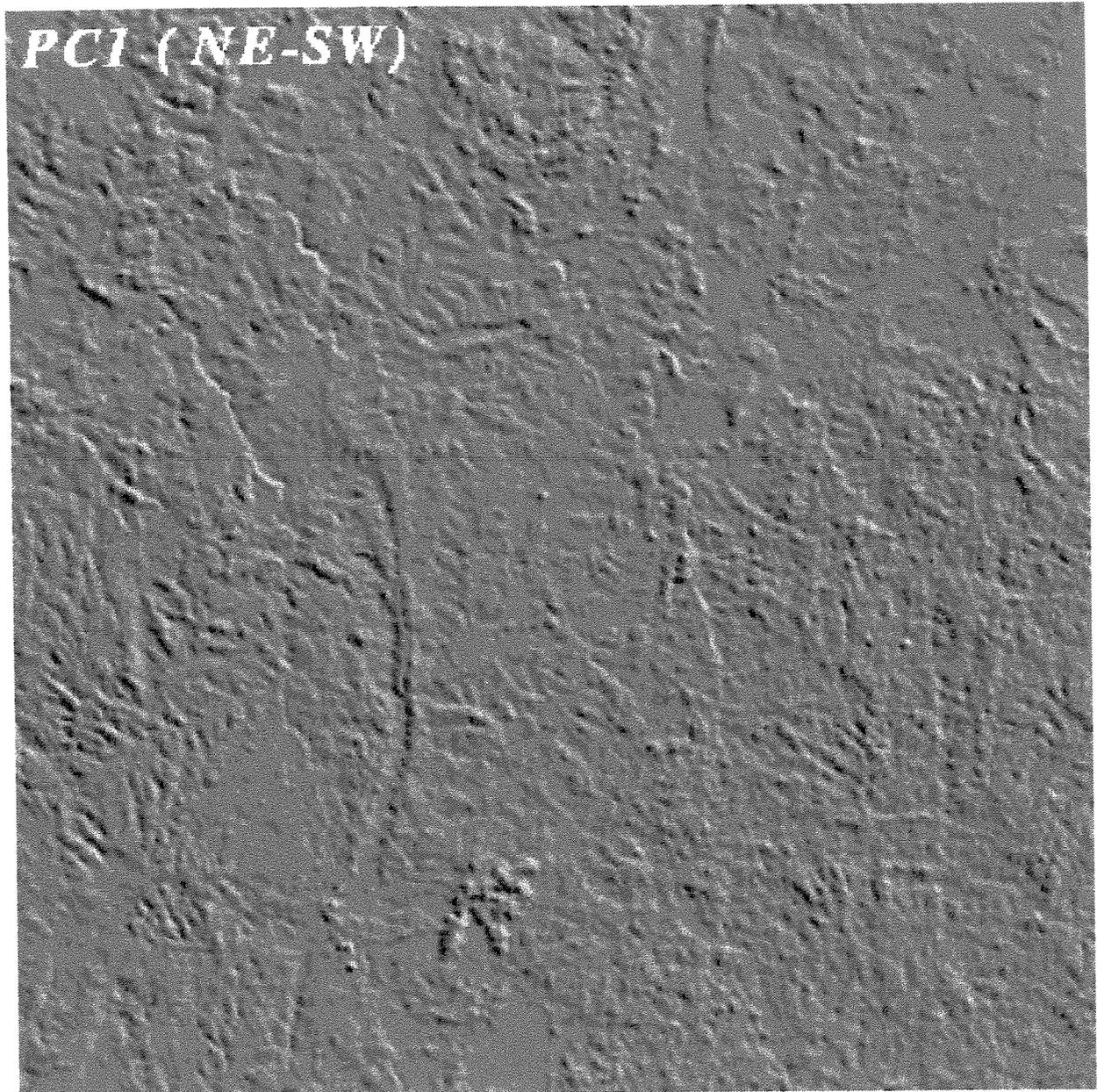


Figura 3.15 - Filtro direcional NE-SW aplicado na imagem PC1 para realce de estruturas NW-SE

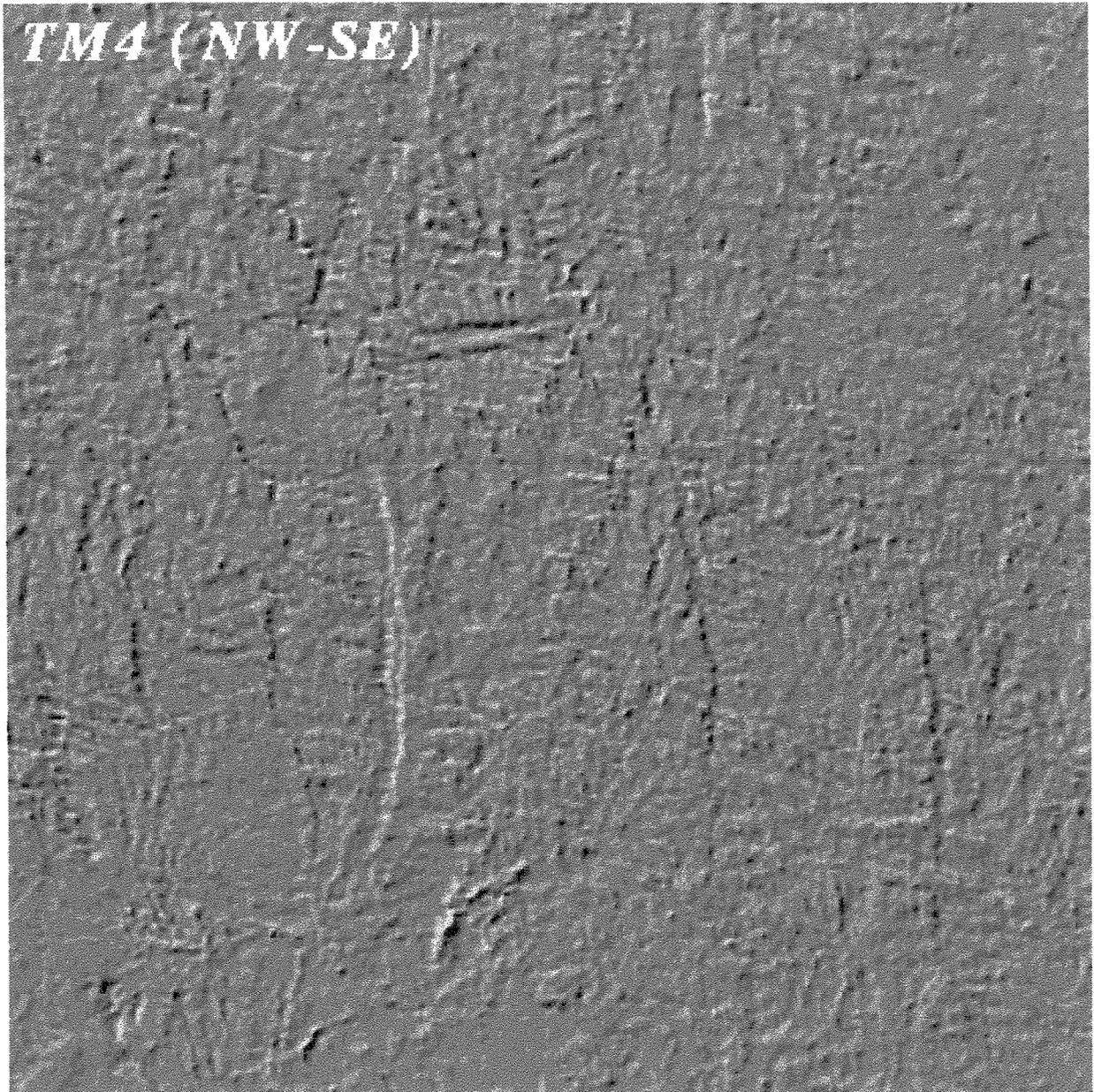


Figura 3.16 - Filtro direcional NW-SE aplicado na imagem TM4 para realce de estruturas NE-SW

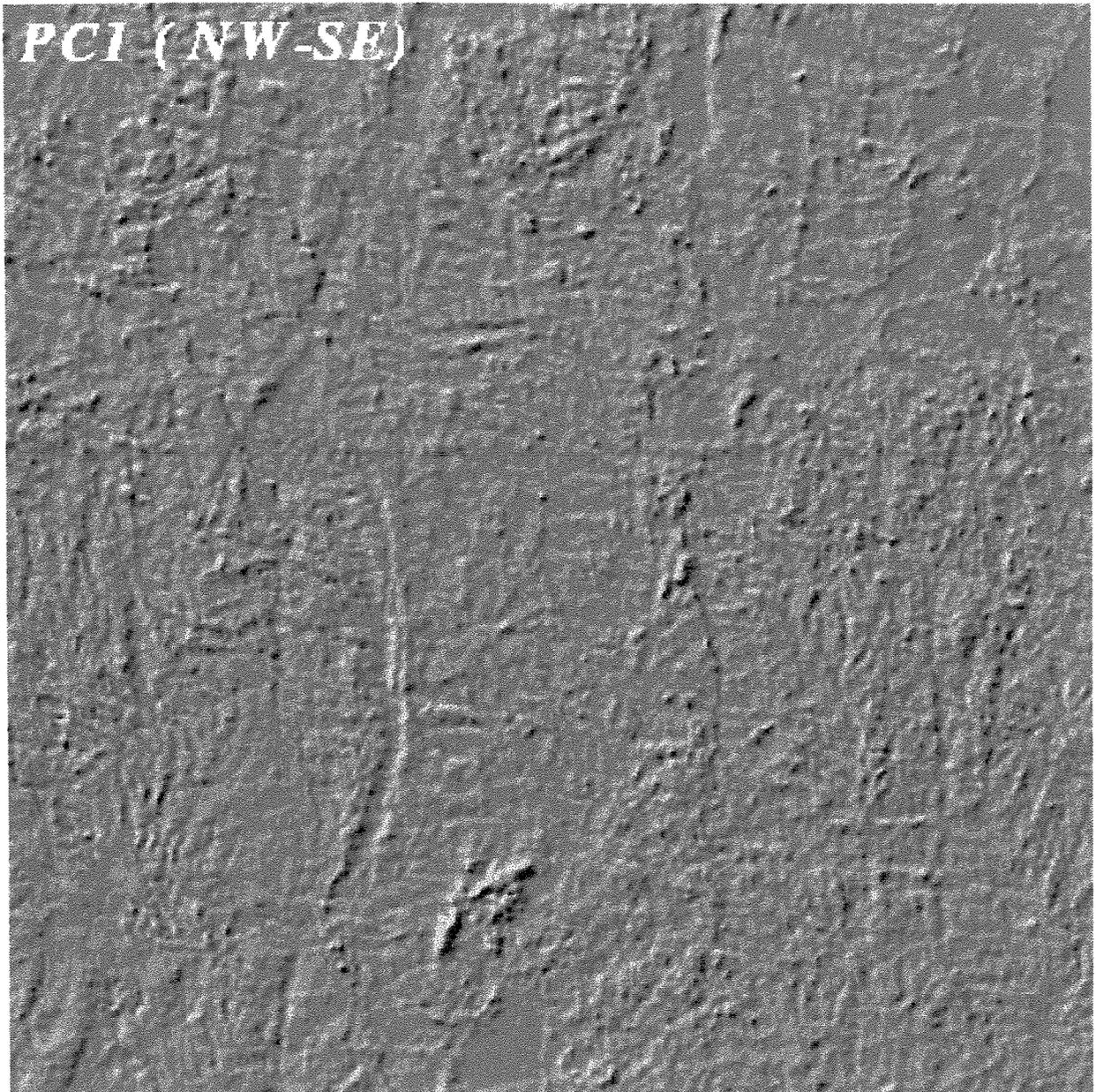


Figura 3.17 - Filtro direcional NW-SE aplicado na imagem PC1 para realce de estruturas NE-SW

3.6.2 - ILUMINAÇÃO EM TEMPO REAL

Esta técnica de realce consiste em utilizar os recursos do *software* ER-Mapper para gerar imagens com azimutes e ângulos de iluminação solar artificiais. O termo artificiais se deve ao fato de que o dado original possui um azimute e um ângulo de iluminação determinados na fase de imageamento pelo sensor, e essa técnica permite simular condições de iluminação artificial sobre a imagem original.

Na região de Riacho dos Machados esta técnica não se mostrou muito favorável à identificação de novas estruturas, sendo o melhor resultado obtido com um azimute de 232 e um ângulo de iluminação de 60°, aplicados sobre a imagem TM4. No *software* é possível se efetuar as mudanças dos parâmetros em tempo real, acompanhando a imagem resultante na tela. A Figura 3.18 apresenta a imagem resultante da aplicação desta técnica.

3.6.3- RESULTADOS OBTIDOS

Os lineamentos encontrados no realce estrutural (sobrepostos à imagem TM4 com filtro direcional para realce de estruturas NE-SW) são apresentados na Figura 3.19. Os resultados mostram que os lineamentos identificados com a aplicação de filtros direcionais não contribuíram para uma melhoria do mapa estrutural da área de estudo. Uma boa interpretação das imagens originais seria suficiente para se obter um produto próximo do apresentado aqui. Além disso, os filtros direcionais poderiam ter sido aplicados somente na TM4, que apresenta resultados melhores que a PC1. Quanto aos resultados obtidos com a iluminação em tempo real, os resultados ficam a desejar e não contribuíram muito para definição de novas estruturas na área.

Os maiores problemas enfrentados na interpretação dos dados estruturais foram:

- ◆ carência de um conhecimento mais profundo da geologia estrutural da área de estudo, onde o conhecimento atual acerca do arcabouço estrutural é ainda muito limitado, faltando realizar mapeamentos de detalhe para definição dos domínios estruturais;
- ◆ ausência de afloramentos com informações estruturais que permitam visualizar os diferentes eventos que atingiram a região;

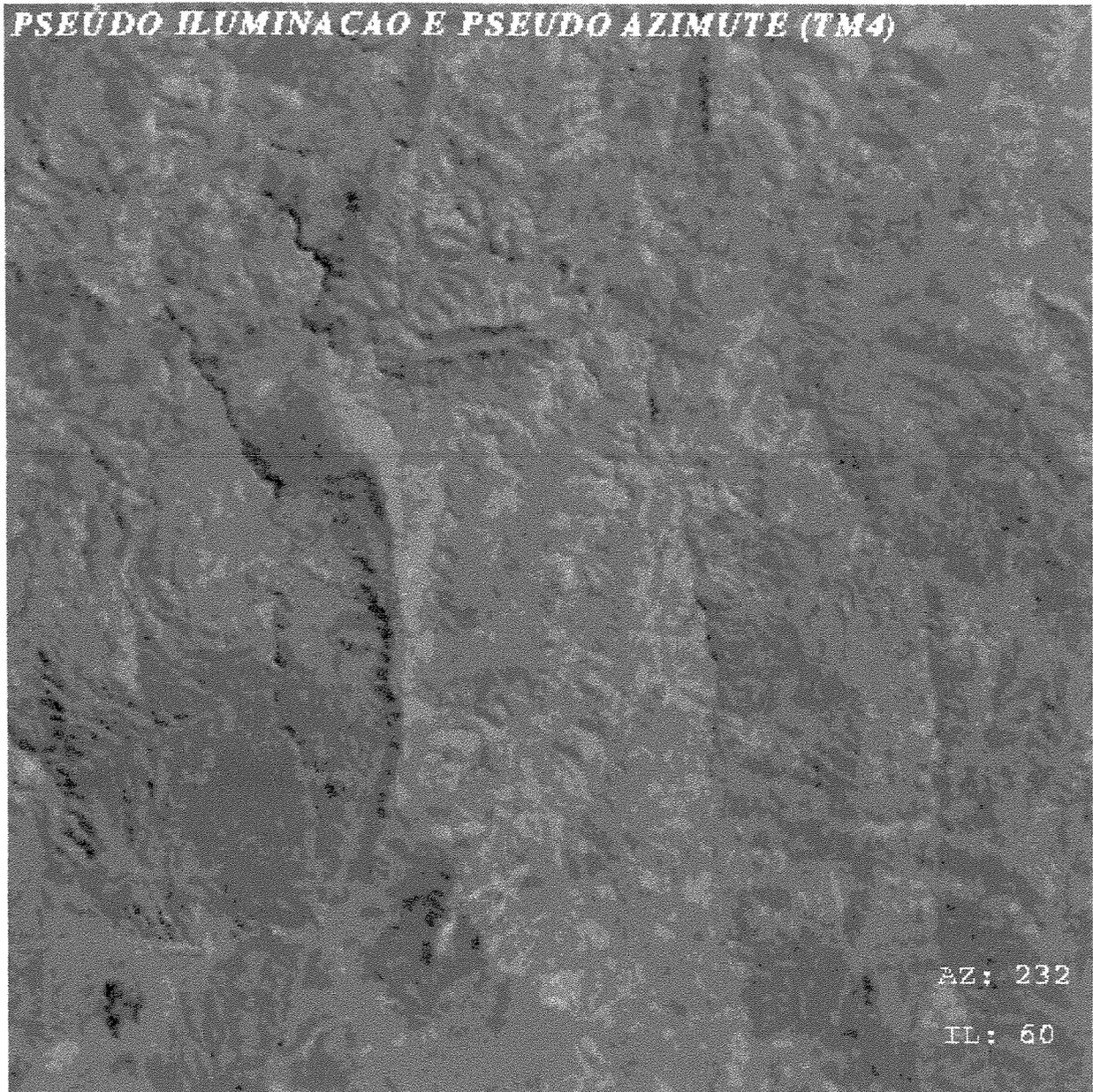


Figura 3.18 - Iluminação em tempo real aplicada sobre a imagem TM4

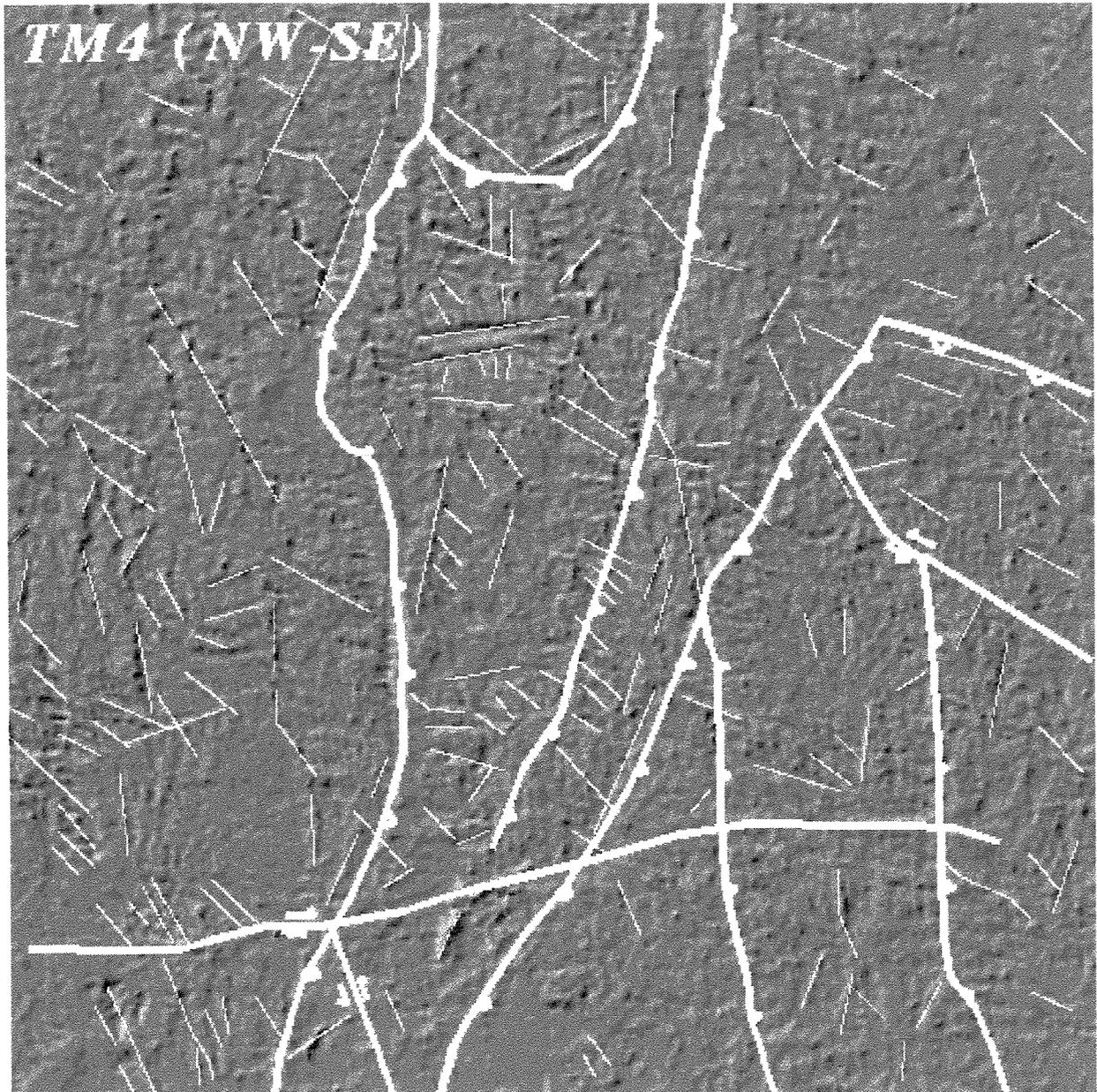


Figura 3.19 -Lineamentos traçados a partir de imagens geradas para realce estrutural sobrepostos à imagem TM4 com filtro NW-SE

Logo, face aos resultados obtidos e ao conhecimento que se tinha até então, não foi possível desenvolver um mapa que mostrasse o arcabouço estrutural da área de estudo.

3.7 - CONFECÇÃO DE CARTAS-IMAGEM GEOLÓGICAS

Terminada a aplicação de técnicas de processamento de imagens utilizou-se os recursos do programa ER-MAPPER que permitem a confecção de mapas e cartas-imagem, que incluem a geração automática de grids, escalas, títulos, legendas e "overlays" de interpretação nas imagens produto geradas. Essas funções são encontradas nos menus *map composition overlay* e *annotation overlay* (Anexo 2).

O resultado final pode ser impresso em uma grande variedade de dispositivos de saída, em preto-e-branco ou a cores (máximo de 16 milhões de cores), em tamanhos que variam segundo o dispositivo, de A-4 até A-0. A Figura 3.20 mostra um exemplo de impressão colorida, usando uma impressora jato de tinta do tipo HP 560C, consistindo da imagem RGB127 do LANDSAT/TM, com grid, escala, legenda, título e orientação do norte.

3.8 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS A PROSPECÇÃO MINERAL

As técnicas usadas compreenderam aumentos de contraste, composições coloridas, subtração de bandas e análise por principais componentes segundo uma de suas variações, conhecida como Técnica Crósta (Loughlin, 1991). Essas técnicas foram selecionadas visando realçar respostas espectrais de óxidos/hidróxidos de ferro e minerais contendo hidroxila, comumente associados à ocorrência de alteração hidrotermal em mineralização aurífera. Os padrões de referência das assinaturas espectrais desses minerais foram baseados nos trabalhos de Abrams et al. (1977), Hunt & Ashley (1979), Goetz (1982) & Grove et al. (1992).

Basicamente, existem duas regiões do espectro eletromagnético onde esses minerais de alteração apresentam feições diagnósticas e algumas dessas áreas são cobertas por bandas espectrais do *Thematic Mapper*. Entretanto, um pouco de mistura de assinaturas espectrais ocorre também entre minerais e outros materiais superficiais, particularmente vegetação. O objetivo foi então usar técnicas de processamento de imagem para extrair a informação espectral especificamente devido a minerais de interesse, a partir do conjunto de imagens originais, discriminando-os de outros materiais e realçando esta informação.

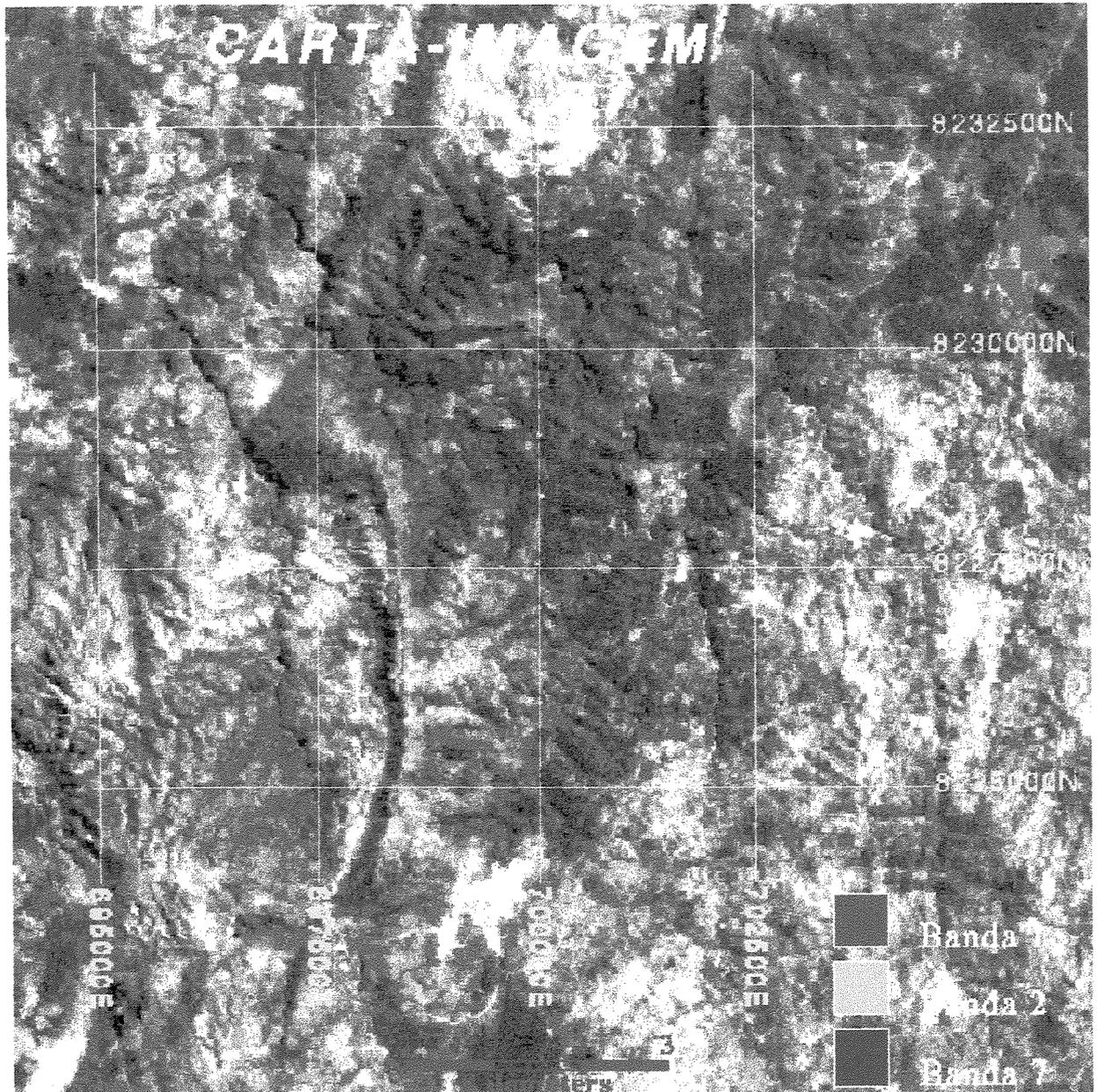


Figura 3.20 - Exemplo de confecção de carta-imagem geológica

A região do visível e infra-vermelho próximo foram usados para óxidos/hidróxidos de ferro e do infra-vermelho de ondas curtas para minerais com hidroxila.

Exemplos desse tipo de aplicação são dados por Ashley & Abrams (1980), Podwysocki et al. (1983), Elvidge & Lyon (1984), Fraser et al. (1986), Magee et al. (1986), Huckerby et al. (1986), Kaufmann (1988), Lamb & Pendock (1989), Rockwell (1989), Crósta & Moore (1989), Moore & Liu (1990), Drury & Berhe (1991), Loughlin (1991) e Crósta & Rabelo (1993). Porém, as limitadas resoluções espacial (30 metros) e espectral (intervalo de comprimento de onda de cada banda - Tabela A1.1 no Anexo 1) das imagens TM não permitem a caracterização do tipo de mineral, nem do tipo de alteração (é muito difícil distinguir minerais gerados por alteração hidrotermal dos minerais gerados por intemperismo e/ou metamorfismo). Estudos posteriores podem ser feitos para esse fim, tais como espectrometria de reflexão e difratometria de raio-X.

3.8.1 - SUBTRAÇÃO DE BANDAS

A técnica de subtração de bandas não tem sido usada com frequência em aplicações geológicas. Um dos problemas com esta técnica é que as bandas a serem subtraídas necessitam primeiro ter seus contrastes equalizados, para evitar o predomínio da banda com maior média e desvio padrão no resultado final. Neste estudo, este problema foi solucionado aplicando a técnica conhecida como Aumento de Contraste Balanceado (Balanced Contrast Enhancement - BCET - Liu, 1991) no par de bandas antes da subtração, produzindo duas novas imagens com o mesmo valor médio e desvio-padrão distribuído linearmente, além da informação já estar contrastada.

Na área de estudo, as bandas TM1 e TM3 foram selecionadas para realçar minerais de óxidos/hidróxidos de ferro porque eles apresentam alta resposta espectral na TM3 e baixa resposta espectral na TM1, tornando o resultado de TM3 menos TM1 altamente favorável como indicador da presença de óxidos/hidróxidos de ferro. TM5 e TM7 foram selecionadas para realçar minerais com hidroxila, devido à sua alta resposta espectral na TM5 e baixa resposta espectral na TM7, tornando o resultado de TM5 menos TM7 altamente favorável como um indicador da presença de minerais contendo hidroxila. As bandas TM3 e TM4 foram escolhidas para mostrar áreas de vegetação mais densa, pois esta apresenta baixa resposta espectral na TM3 e alta resposta espectral na TM4, tornando o resultado de TM4 menos TM3 um índice de vegetação.

Uma composição colorida com TM3-TM1 no vermelho, TM5-TM7 no verde e TM4-TM3 no azul (Figura 3.8), mostra ocorrências de óxidos/hidróxidos de ferro em tons de vermelho, minerais contendo hidroxila em tons de verde, vegetação em tons azulados e a ocorrência junto de óxidos/hidróxidos de ferro e minerais com hidroxila em tons de amarelo (estas ocorrem muito localmente na imagem).

O uso desta técnica na área do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados permite a identificação, na Unidade Ouro Fino, de regiões com ocorrência simultânea de óxidos/hidróxidos de ferro e minerais com hidroxila, sendo estas potenciais para concentrações de ouro.

3.8.2 - ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS (TÉCNICA CRÓSTA)

A técnica FOPCS (*Feature Oriented Principal Component Selection*) (Crósta & Moore, 1989; Crósta & Rabelo, 1993), conhecida como *Técnica Crósta* (Loughlin, 1991), consiste basicamente na pré-seleção de dois sub-grupos de 4 bandas do TM, levando-se em conta as respostas espectrais de um ou mais minerais de interesse. Neste estudo, os dois sub-grupos foram formados pelas bandas 1, 3, 4 e 5 (para mapear óxidos/hidroxidos de ferro), e bandas 1, 4, 5 e 7 (para mapear minerais com hidroxila). A técnica de análise por componentes principais foi então aplicada separadamente nesses dois sub-grupos. As estatísticas dos autovetores para os dois subgrupos são apresentados nas Tabelas 3.9 e 3.10, mostrando como cada imagem principal componente é formada em relação às porcentagens de contribuição a partir das bandas originais do TM.

ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS PARA REALCE DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO					
	TM1	TM3	TM4	TM5	
	AUTOVETORES				AUTOVALORES
PC1	12.52	21.55	3.95	61.98	85.90
PC2	6.04	8.09	- 84.51	1.36	10.80
PC3	- 27.06	- 45.36	- 5.96	21.62	2.80
PC4	61.89	- 36.89	0.94	0.29	0.50

Tabela 3.9 - Coeficientes dos autovetores para o conjunto TM1/TM3/TM4 e TM5

ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS PARA REALCE DE MINERAIS COM HIDROXILA					
	TM1	TM4	TM5	TM7	
AUTOVETORES					AUTOVALORES
PC1	11.70	3.53	58.69	26.08	87.40
PC2	4.98	- 83.54	- 0.76	10.72	10.40
PC3	- 38.40	- 6.66	22.48	- 32.46	1.40
PC4	43.15	- 3.04	10.73	- 43.09	0.80

Tabela 3.10 - Coeficientes dos autovetores para o conjunto TM1/TM4/TM5 e TM7

Comparando esses dados estatísticos e as curvas espectrais de minerais de interesse, foi possível prevêr quais imagens PC continham a informação espectral desejada. A imagem PC contendo moderada ou alta contribuição das bandas TM1 e TM3, com sinais opostos, analisada a partir do grupo 1, 3, 4 e 5, contém grande parte da informação espectral associada a presença de óxidos/hidróxidos de ferro (chamada de Componente Fe). A principal componente mostrando moderada ou alta contribuição das bandas TM5 e TM7 com sinais opostos, analisada a partir do grupo 1, 4, 5 e 7, foi a imagem contendo muito da informação espectral devido a presença de minerais com hidroxila (chamada de Componente Hy). A principal vantagem desta técnica é que a informação espectral desejada está frequentemente em uma PC de maior ordem, com uma quantidade mínima de informação espectral de outros materiais.

A análise dos coeficientes dos autovetores obtidos nas imagens na Tabela 4.9 revelam que a informação de minerais férricos estará na Principal Componente 4 (PC4) das bandas 1, 3, 4 e 5. Similarmente, a Tabela 4.10 mostra que para os minerais com hidroxila a informação desejada estará na Principal Componente 3 (PC3) das bandas 1, 4, 5 e 7.

O último passo consiste na geração de uma terceira imagem, combinando ambas as Componentes Fe e Hy, onde áreas contendo ambos, óxidos/hidróxidos de ferro e minerais com hidroxila, serão representadas em pixel claros. Esta componente recebeu o nome de Componente Fe+Hy e foi obtida submetendo-se a Componente Fe e a Componente Hy a uma nova análise por componentes principais e selecionando a primeira PC como a Componente Fe+Hy.

Combinando as Componentes Fe, Hy e Fe+Hy em uma composição colorida RGB (Figura 3.21) , esta mostrará a informação espectral relacionada a óxidos/hidróxidos de ferro em vermelho, minerais contendo hidroxila em azul e a coincidência de ambos em branco. Estes pixels brancos são portanto as áreas com maior potencial para mineralização aurífera, desde que elas representam áreas onde sulfetos intemperizados e minerais hidrotermais ocorrem em conjunto.

3.8.3 - RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos para a região de Riacho dos Machados mostram que, apesar da resolução espacial (30 metros) e espectral (7 bandas) das imagens LANDSAT Thematic Mapper, a aplicação de técnicas adequadas de processamento de imagem pode realçar a informação relacionada à ocorrência de minerais de interesse, separando esta informação de outros materiais superficiais. Neste caso, as técnicas permitiram a caracterização de ocorrências superficiais de minerais relacionados a processos de alteração hidrotermal, identificando perfeitamente todas as áreas de ocorrências conhecidas na região de interesse.

Uma comparação entre as duas técnicas mostrou que elas apresentaram resultados similares. Entretanto, a Técnica Crósta é mais eficiente na extração e realce de informação espectral específica, embora mais demorada e complexa em relação à subtração de bandas. Portanto, a subtração de bandas pode ser usada em uma primeira abordagem para a seleção de alvos em um contexto regional, ao passo que a Técnica Crósta pode ser usada para realçar a informação espectral para os dois grupos de minerais de interesse em áreas pré-selecionadas.

O uso dessas técnicas na região, ou em áreas com condições geológicas e fisiográficas similares, constitui uma importante ferramenta de trabalho nos estágios iniciais dos programas de exploração geológica, permitindo que áreas extensivas possam ser rapidamente analisadas para a definição de alvos potenciais, a um baixo custo.

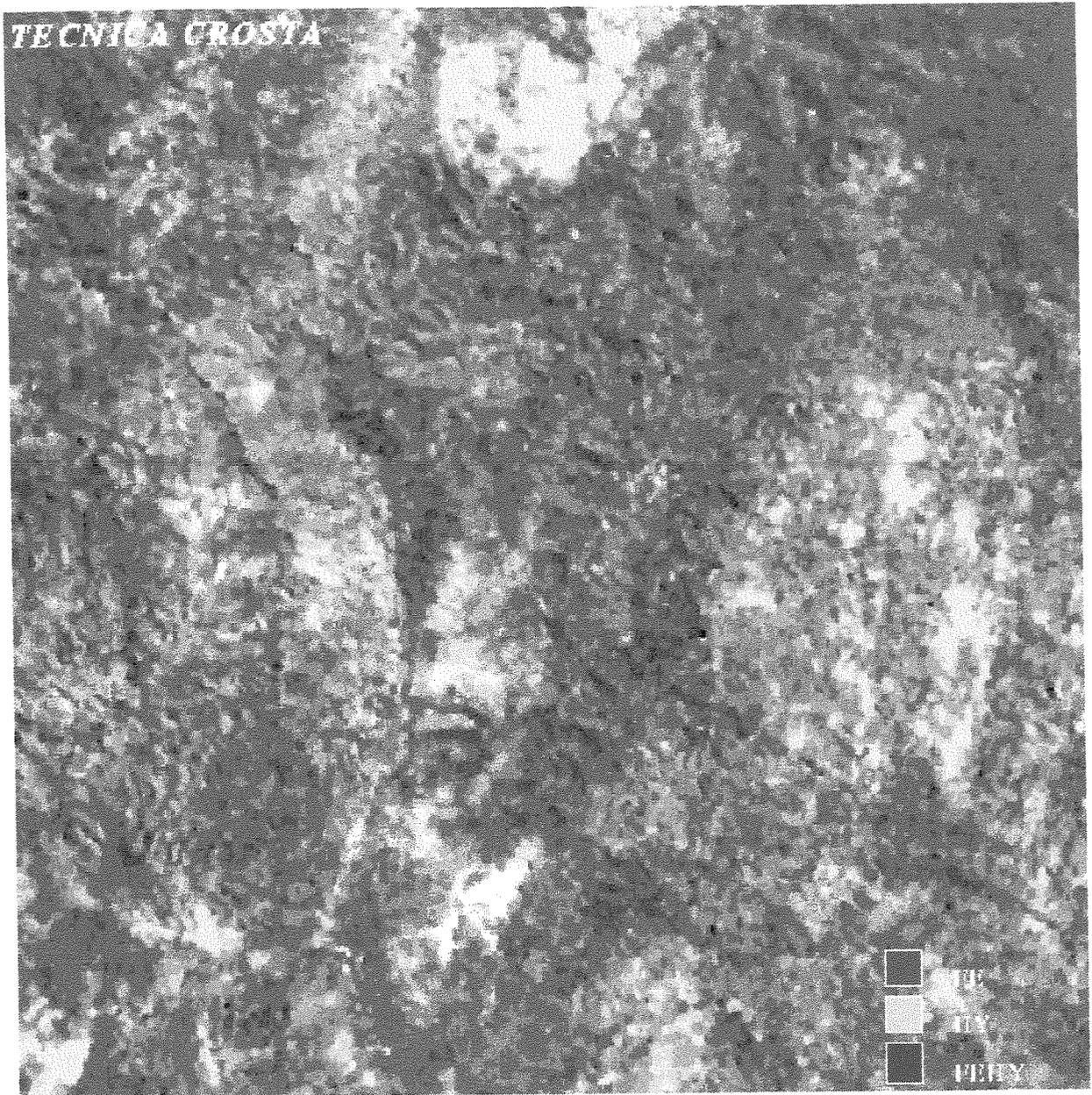


Figura 3.21 - Composição colorida das componentes determinadas na Técnica Crósta

CAPÍTULO 4

ESPECTROMETRIA DE REFLEXÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

Os diferentes materiais que compõem a superfície terrestre caracterizam-se por apresentar, cada um, uma assinatura espectral típica. Isso implica em que o comportamento espectral desses materiais mostre feições de absorção e reflexão distintos. Estudos específicos envolvendo medidas espectrais de rochas e minerais (Hunt & Salisbury, 1970; Hunt, 1979; Hunt & Ashley, 1979; Goetz et al., 1982; Crowley, 1984; Krohn, 1986 e Grove et al., 1992) estabeleceram bibliotecas espectrais de referência, que têm servido de suporte na correlação entre feições espectrais observadas em imagens de sensoriamento remoto e a possível ocorrência de mineralizações, notadamente aquelas geradas por processos de alteração hidrotermal. Entretanto, esses estudos foram realizados em sua maior parte com amostras provenientes de climas áridos a semi-áridos, onde o intemperismo praticamente não provoca transformações mineralógicas.

No Brasil, o clima sub-tropical a tropical gera profundas transformações mineralógicas em superfície, provocando uma mistura de minerais primários e minerais gerados por intemperismo das rochas. Torna-se então necessário adaptar os padrões estabelecidos nos estudos clássicos realizados em clima semi-árido a árido, aos padrões obtidos em climas sub-tropical a tropical. A importância dessa adaptação reside no fato de que, em nosso país, muitas jazidas estão cobertas por essa mistura de minerais primários e intempéricos, sendo então essa caracterização espectral um instrumento importante nos trabalhos de prospecção mineral utilizando sensoriamento remoto.

Os dados de espectrometria de reflexão obtidos para a região do Depósito de Riacho dos Machados e apresentados neste estudo vêm se somar a outros já obtidos no Brasil (Meneses, 1986; Paradella, 1987; Crósta, 1990; Vitorello & Galvão, 1992, Ferreira Jr., 1993, Crósta, 1993 e Meneses et al., 1993). Esses dados passam a ter importância progressivamente maior com a utilização de sensores de maior resolução espectral em território brasileiro, como é o caso do GEOSCAN/AMSS e do JERS (OPS).

4.2 - ORIGEM DAS FEIÇÕES ESPECTRAIS RELACIONADAS A MINERAIS DE INTERESSE À PROSPECÇÃO MINERAL

A região do espectro eletromagnético de maior interesse em sensoriamento remoto varia de 400 a 2500 nanômetros, sendo que neste intervalo destacam-se duas sub-regiões: a primeira situada entre 400 e 1.000 nanômetros; a segunda situada entre 2.000 e 2.400 nanômetros. Os trabalhos de Rowan (1972), Rowan et al. (1974,1977), Abrams et al., (1977) e Hunt & Ashley (1979) mostraram que os óxidos/hidróxidos de ferro e os minerais contendo a molécula OH (hidroxila) podem ser caracterizados por sensores que captam informações nestas regiões do espectro eletromagnético.

INTERVALO DE 400 A 1000 nm

No intervalo de 400 a 1.000 nm pode-se caracterizar a presença ou não do íon férrico (Fe 3+), ao qual se associam dois tipos de feições de absorção de energia eletromagnética (Hunt & Salisbury, 1970):

a) transferência de carga: absorção generalizada que ocorre mais intensamente na região do ultravioleta e diminui progressivamente em direção à região do visível e infravermelho próximo.

b) efeito de campo cristalino: esta feição está associada a três feições de absorção mais localizadas e de menor amplitude, situadas por volta de 450, 650 e entre 850-950 nm (Figura 4.1). A feição em 450 nm está associada à presença de jarosita e a feição em 650 nm à presença de goetita. Entre 850-950 nm os três minerais apresentam feição de absorção. Porém, Hunt & Ashley (apud Crósta, 1990) mostraram que amostras onde a quantidade de hematita predomina sobre a quantidade de goetita, essa feição de absorção localiza-se mais próxima a 850 nm. Da mesma forma, quando a quantidade de goetita é maior do que hematita, a feição se situa mais próxima à 950 nm. Já quando as quantidades de hematita e goetita são equivalentes, a feição se situa entre 850 e 950 nm. Nos climas sub-tropicais e tropicais, misturas de proporções variadas de hematita e goethita formam uma mistura denominada de limonita (muitas vezes adotada erroneamente como um único mineral, de composição definida, na literatura relacionada à sensoriamento remoto - Crósta, 1990). Em locais onde ocorrem mineralizações auríferas associadas a zonas de alteração hidrotermal, a limonita é comumente o resultado da alteração intempérica de sulfetos e se apresenta superficialmente em concentrações anômalas. Porém, é comum a presença de limonita associada a capas lateríticas

ferruginosas, sem qualquer relação com depósitos minerais (Crósta, op. cit.). Isso mostra que, dada a importância da limonita na exploração mineral, é necessário uma melhor definição da composição e do comportamento espectral da mesma.

Alguns estudos realizados na Austrália, EUA e Brasil (Raines et al., 1985; Crósta, 1990,1993) têm mostrado que a lateritização de sulfetos associados a mineralizações produz "gossans" com um maior conteúdo de goetita em relação à hematita. Embora os dados disponíveis ainda não sejam suficientes para permitir generalizações, esse parâmetro tem sido utilizado no mapeamento de feições espectrais anômalas associadas à presença de corpos sulfetados em sub-superfície.

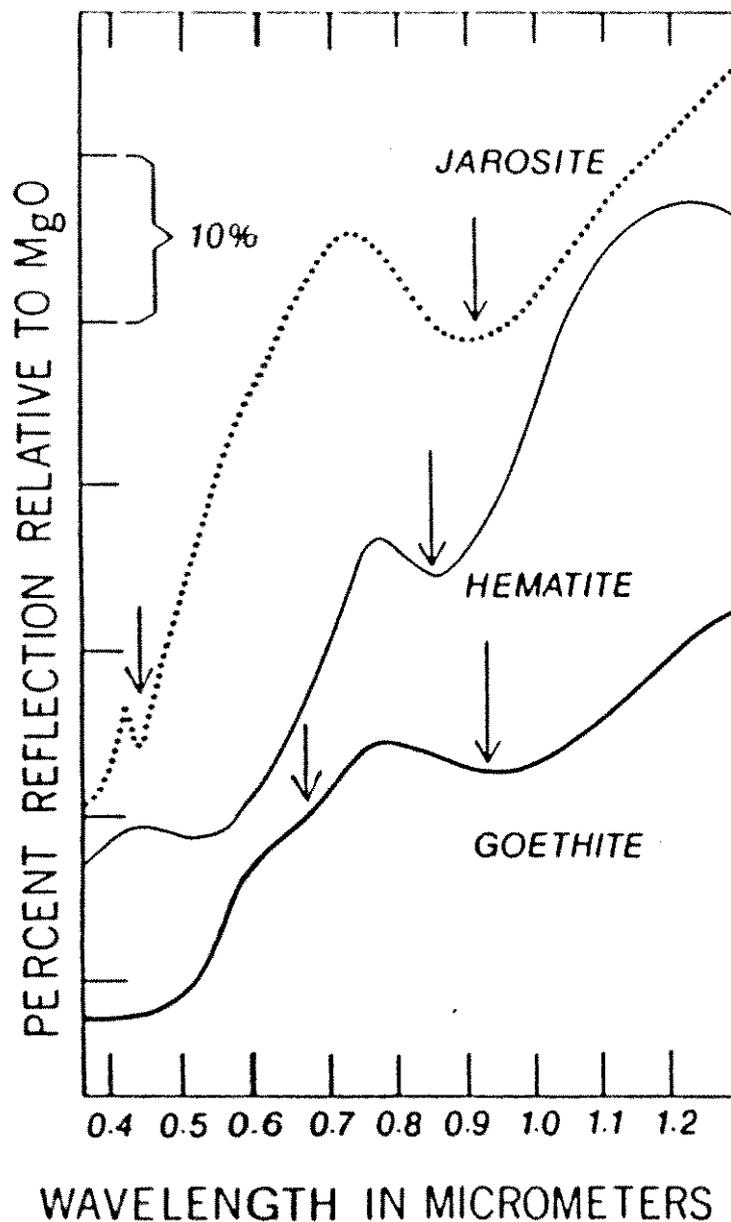


Figura 4.1 - Feições associadas à transição eletrônica de óxidos/hidróxidos de ferro

INTERVALO DE 1400 A 2200 nm

No intervalo de 1.400 a 2.200 nm as feições de absorção estão relacionadas a transições vibracionais de moléculas do grupo das hidroxilas (OH⁻), sendo este processo denominado de **vibracional**. Este intervalo é muito importante pelo fato de ocorrerem feições de absorção características de minerais de alteração hidrotermal que possuem moléculas OH⁻, tais como kaolinita, pirofilita, alunita, montmorillonita, sericita-muscovita, buddingtonita, clorita, epidoto e dickita. Essas feições estão associadas à intensa absorção de energia neste intervalo, exibindo três inflexões características localizadas por volta de 1.400, 1.900 e 2.200 nm.

A interpretação das curvas neste intervalo será feita para identificar a presença de sericita-muscovita e kaolinita, pois dentre os minerais de alteração hidrotermal, esses apresentam uma relação direta com a zona mineralizada no Depósito de Riacho dos Machados. A kaolinita apresenta uma dupla feição de absorção por volta de 1400 e de 2200 nm, além de uma feição de absorção característica em 1900 nm (Figura 4.2). Já a sericita-muscovita, apresenta feições de absorção em 1400 e 2200 nm mais intensas e não duplas. Além disso, a feição de absorção em 1900 nm é menos intensa que na kaolinita (Figura 4.3). Um dos maiores problemas com estas inflexões, características da presença destes minerais, é que a água também possui forte feição de absorção em 1.400 e 1.900 nm.

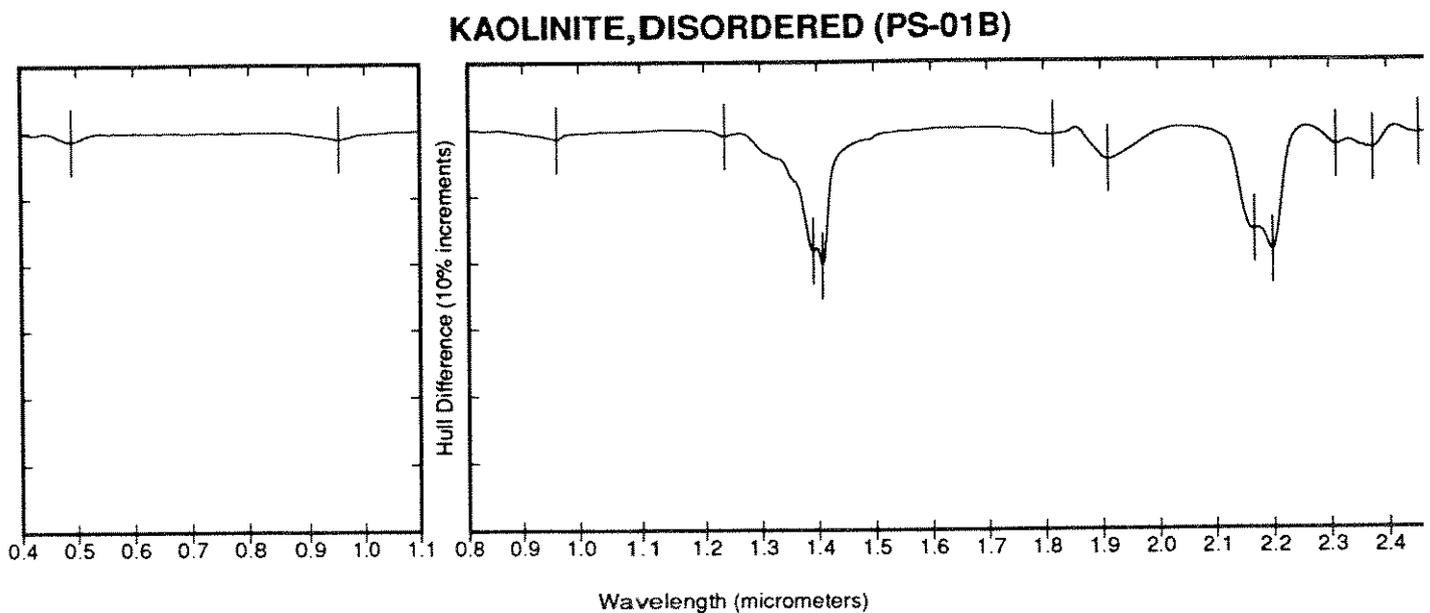


Figura 4.2 - Feições de absorção características da kaolinita

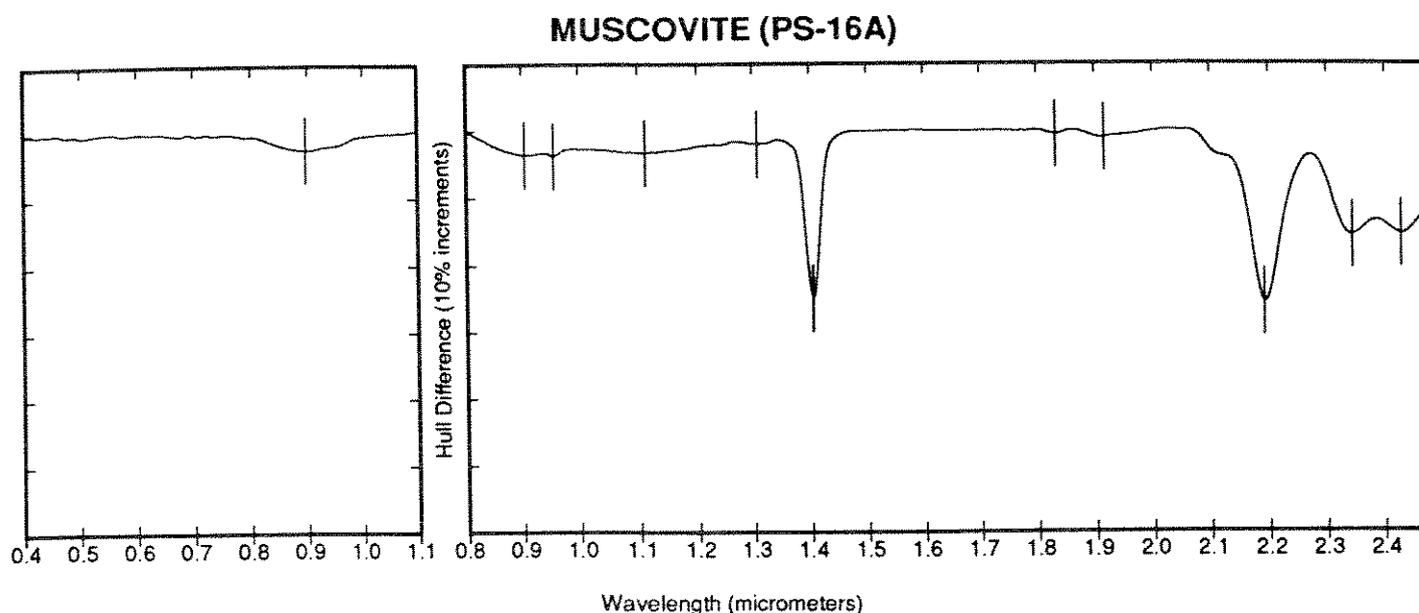


Figura 4.3 - Feições de absorção características da sericita-muscovita

4.3 - METODOLOGIA

O passo inicial do estudo se deu na primeira etapa de campo, onde foram coletadas 72 amostras de solo e rocha. As amostras coletadas estão associadas a zonas de alteração hidrotermal relacionadas a mineralizações auríferas. Os locais de amostragem foram estabelecidos em conjunto com os geólogos da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), que indicaram as principais ocorrências das zonas de alteração na região da mina e em locais à ela, onde ainda ocorriam rochas mineralizadas em superfície.

A amostragem foi realizada, sempre que possível, desde a encaixante até a zona mineralizada, coletando-se amostras em superfície, totalmente intemperizadas, e amostras mais frescas, a profundidades de no máximo um metro. Esse método teve por objetivo analisar os contrastes espectrais entre cada litologia presente na região da alteração hidrotermal e os correspondentes solos residuais. Os critérios de amostragem foram estabelecidos em função da caracterização litológica realizada por Fonseca (1993) e extrapolada para áreas adjacentes ao Depósito de Riacho dos Machados.

Das 72 amostras coletadas, 17 foram selecionadas para realização das medidas espectrais e difratometria de raios-X. As amostras selecionadas foram divididas em 4 seções, sendo as amostras coletadas em um mesmo perfil (encaixante-zona mineralizada)

colocadas numa mesma seção. Além disso, foram selecionadas apenas as amostras inseridas na área de trabalho do GEOSCAN/AMSS (visto que objetivava-se utilizar os resultados desses dados na interpretação das imagens) e aquelas situadas nos principais alvos da empresa. As Tabelas 4.1 a 4.4 mostram as características das amostras selecionadas.

O passo seguinte consistiu na preparação do material para análise por difratometria de raios-X e espectrometria de reflexão, consistindo inicialmente na retirada de materiais mais grosseiros, tais como fragmentos de quartzo e pedaços de raízes. A seguir realizou-se uma moagem manual e separação do material em duas porções: uma para medidas espectrais e outra para difratometria de raio-X. Ressalta-se que a moagem foi manual para preservação da granulação, textura e estrutura original das amostras (Ferreira Jr. et al. , 1993).

Dada a impossibilidade prática em se realizar a difratometria de raios-X na Universidade de Brasília (UnB) ou na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), que contam ambas com modernos equipamentos e metodologia de preparação e interpretação das amostras (principalmente na identificação de argilo-minerais), optou-se por utilizar o Laboratório Km 14, da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). Os resultados fornecidos por esse laboratório apresentam duas grandes limitações para este estudo: não foi realizado uma preparação específica das amostras para identificação de argilo-minerais e não foram fornecidos os respectivos difratogramas. Conseqüentemente, não foi possível utilizar as informações de difratometria de raios-X específicas para argilo-minerais na interpretação das curvas espectrais.

As medidas espectrais foram realizadas utilizando-se um espectrofotômetro Beckman modelo UV-5240, equipado com esfera de integração, do Desert Research Institute, Universidade de Nevada, Reno.

As curvas espectrais apresentaram muitos ruídos, gerando feições (artefatos) mais intensos em 480, 590, 700, 800, 1.010, 1.510 e 2.300 nm. Essas feições foram descartadas no processo de interpretação das curvas.

PERFIS	AMOSTRAS	LITOLOGIA	ANÁLISE POR XRD		OBSERVAÇÕES
SEÇÃO I	RM 06	quartzo bandado (amostrado em sub-superfície)	goetita/limonita muscovita	quartzo kaolinita	zona mineralizada
	RM 07	biotita estauroilita xisto (amostrado em sub-superfície)	goetita/limonita muscovita	quartzo kaolinita	encaixante
	RM 08	clorita xisto (amostrado em sub-superfície)	goetita/limonita quartzo gipsita	hematita muscovita kaolinita	encaixante
	RM 11	solo avermelhado	goetita/limonita quartzo gipsita	hematita muscovita kaolinita	solo associado a blocos de quartzo bandado

Tabela 4.1 - Características das amostras analisadas (Seção I)

PERFIS	AMOSTRAS	LITOLOGIA	ANÁLISE POR XRD		OBSERVAÇÕES
SEÇÃO II	RM 12	quartzo muscovita xisto (amostrado em sub-superfície)	goetita/limonita muscovita	quartzo kaolinita	QMX não mineralizado (amostra menos intemperizada)
	RM 13	quartzo muscovita xisto (amostrado em superfície)	goetita/limonita quartzo montmorilonita	hematita muscovita	QMX não mineralizado (amostra mais intemperizada)
	RM 14	biotita clorita xisto (amostrado em sub-superfície)	quartzo muscovita kaolinita		encaixante (menos intemperizada)
	RM 15	biotita clorita xisto (amostrado em superfície)	goetita/limonita quartzo	hematita muscovita kaolinita	encaixante (mais intemperizada)

Tabela 4.2 - Características das amostras analisadas (Seção II)

PERFIS	AMOSTRAS	LITOLOGIA	ANÁLISE POR XRD		OBSERVAÇÕES
SEÇÃO III	RM 16	veio de quartzo sacaroide (rico em Fe, amostrado em sub-superfície)	goetita/limonita quartzo kaolinita	hematita muscovita	zona mineralizada (mais intemperizada)
	RM 17	veio de quartzo sacaroide (rico em Fe, amostrado em superfície)	goetita/limonita quartzo kaolinita	hematita muscovita	zona mineralizada (menos intemperizada)
	RM 18	clorita xisto (amostrado em sub-superfície)	goetita/limonita quartzo kaolinita	hematita muscovita	encaixante
	RM 19	clorita xisto (amostrado em superfície)	goetita/limonita quartzo kaolinita	hematita muscovita	encaixante

Tabela 4.3 - Características das amostras analisadas (Seção III)

PERFIS	AMOSTRAS	LITOLOGIA	ANÁLISE POR XRD		OBSERVAÇÕES
SEÇÃO IV	RM 38	xisto quartzo feldspático	goetita/limonita kaolinita muscovita	hematita quartzo vermiculita ilita	encaixante
	RM 39	xisto de transição (entre XQF-QMX)	goetita/limonita quartzo plagioclásio	kaolinita muscovita ilita	encaixante
	RM 40	quartzo muscovita xisto	kaolinita muscovita montmorilonita	quartzo ilita	zona mineralizada
	RM 41	xisto de transição (entre QMX-BX)	hematita quartzo ilita montmorilonita	kaolinita muscovita vermiculita	encaixante
	RM 42	biotita xisto	goetita/limonita kaolinita muscovita montmorilonita	hematita quartzo ilita	encaixante

Tabela 4.4 - Características das amostras analisadas (Seção IV)

4.4 - ANÁLISE DAS CURVAS ESPECTRAIS

Levando-se em conta que a presença de Fe³⁺ e OH⁻ em produtos de alteração hidrotermal são em grande parte responsáveis pelas feições de absorção observadas nas curvas espectrais desses materiais, limitou-se a discussão dos espectros aos óxidos/hidróxidos de ferro (goetita e hematita) e minerais hidratados (muscovita-sericita e kaolinita) relacionados à mineralização aurífera na região de Riacho dos Machados.

A **SEÇÃO I** é constituída pelas curvas das amostras RM06 (Figura 4.4), RM07 (Figura 4.5), RM08 (Figura 4.6) e RM11 (Figura 4.7), coletadas na trincheira TC 11830, no alvo denominado pela DOCEGEO de Alvo Cinco Mil, situado a norte da mina.

Geologicamente, as amostras da **SEÇÃO I** correspondem a:

- ✦ RM06: quartzo bandado mineralizado, amostrado aproximadamente 1 metro abaixo da superfície;
- ✦ RM07: biotita estauroilita xisto, amostrado aproximadamente 1 metro abaixo da superfície;
- ✦ RM08: clorita xisto, amostrado aproximadamente 1 metro abaixo da superfície;

- ✦ RM11: solo avermelhado com blocos de quartzo bandado, amostrado em superfície próximo da trincheira;

Em todas as amostras dessa seção observa-se uma absorção decrescente entre 400 e 600 nm, devido à presença do íon férrico. Apenas a amostra RM06 mostra uma suave feição de absorção por volta de 653 nm, relacionada à presença de goetita. No intervalo de 850-950 nm todas as amostras apresentam feição de absorção, sendo mais marcante nas amostras RM06, RM07 e RM08 (a amostra RM11 apresenta uma suave feição de absorção). A feição de absorção mais intensa observada nas amostra RM-06, RM07, RM08 e RM11 neste intervalo ocorre, respectivamente em 911, 865, 854 e 853 nm. Da amostra RM06 até a amostra RM11 ocorre uma diminuição do comprimento de onda da feição de absorção, indicando que a quantidade de goetita diminui da amostra RM06 para a amostra RM11 e que nas amostras RM07, RM08 e RM11 a feição de absorção é devido à presença de hematita. A distribuição relativa dos minerais obtida por difratometria de raios-X (Figuras 4.8 a 4.11) confirma a diminuição da quantidade de goetita da amostra RM06 para a amostra RM11 e a presença de hematita nas amostras RM08 e RM11. Na amostra RM07, apesar da feição de absorção indicar a presença de hematita, a difratometria de raios-X não registrou a presença deste mineral.

Feições de absorção são observadas também em 1.400, 1900 e 2.200 em todas as amostras desta seção, sendo mais intensas na amostra RM08. As feições de absorção em 1.400 nm e 1900 nm estão associadas provavelmente à pequena quantidade de água presente nas amostras. Porém, na amostra RM08, observa-se dupla feição de absorção em 1400 e 2200 nm, além de uma feição de absorção mais intensa em 1900 nm, indicando que a quantidade de kaolinita na amostra RM08 é maior do que nas demais amostras. Nas amostras RM06, RM07 e RM11, não se observa a dupla feição de absorção em 1400 e 2200 nm, indicando provavelmente que a quantidade de sericita-muscovita nessas amostras é maior do que a quantidade de kaolinita.

Uma relação entre as curvas espectrais e as litologias mostra que o quartzo bandado mineralizado apresenta as feições de absorção mais marcantes, relacionadas à presença de goetita e de sericita-muscovita (que predomina sobre kaolinita). As encaixantes, um biotita-estauroilita xisto e um clorita xisto, apresentam uma diminuição na quantidade de goetita e sericita-muscovita, além do aparecimento da hematita e aumento da quantidade de kaolinita.

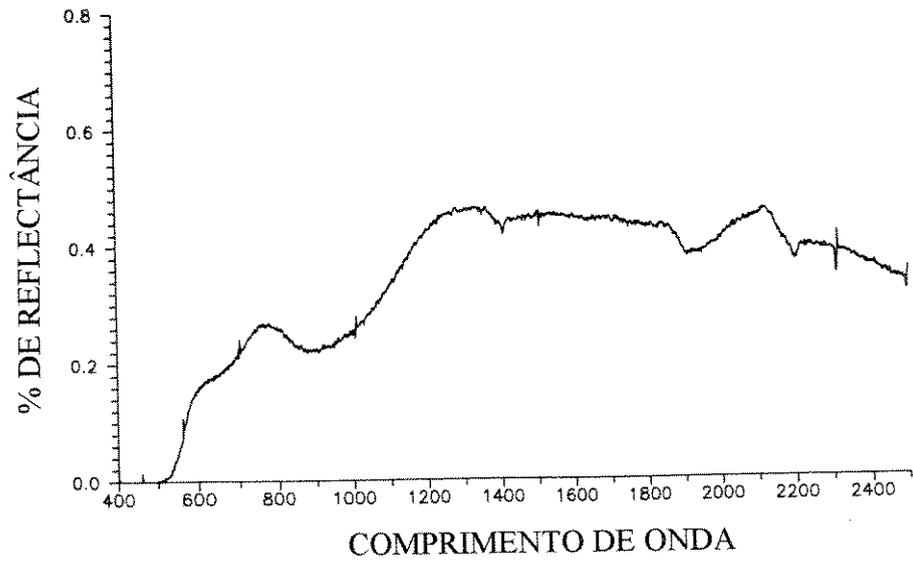


Figura 4.4 - Curva espectral da amostra RM06

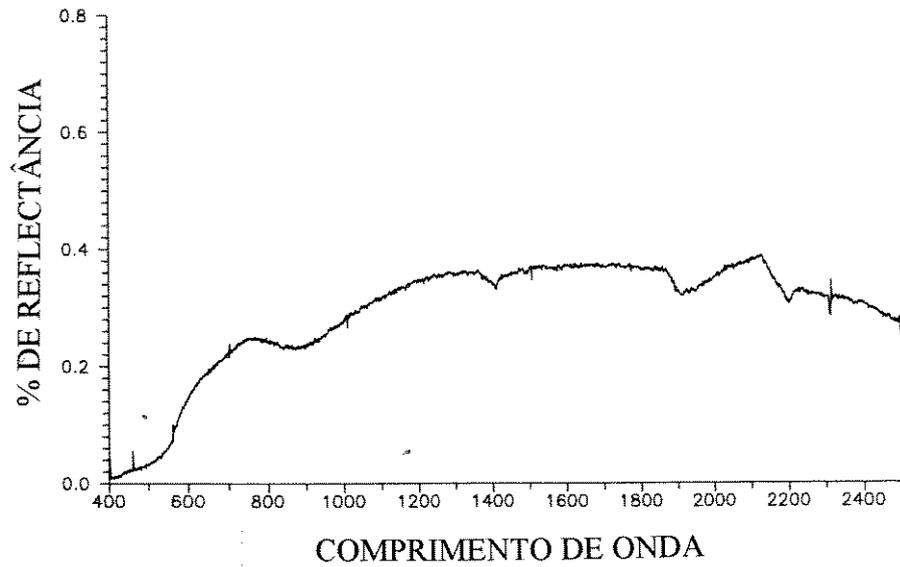


Figura 4.5 - Curva espectral da amostra RM07

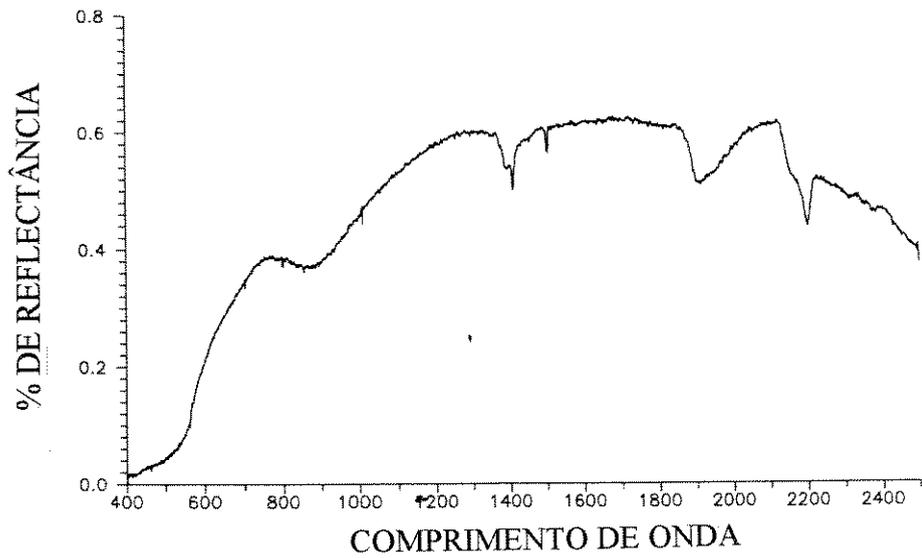


Figura 4.6 - Curva espectral da amostra RM08

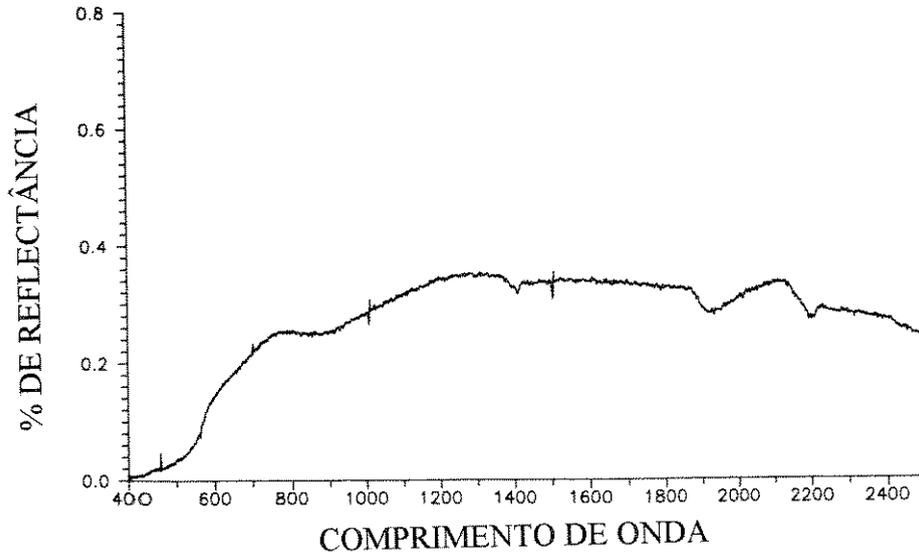


Figura 4.7 - Curva espectral da amostra RM11

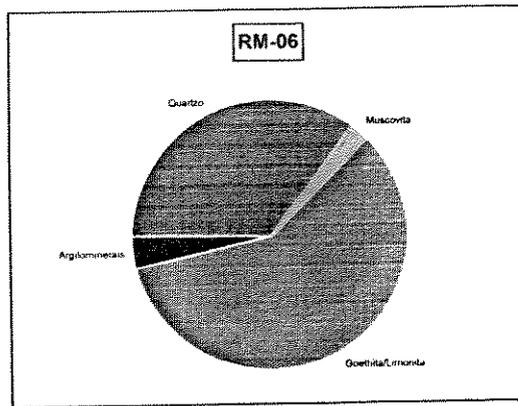


Figura 4.8 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM06 obtida por difratometria de raios-X

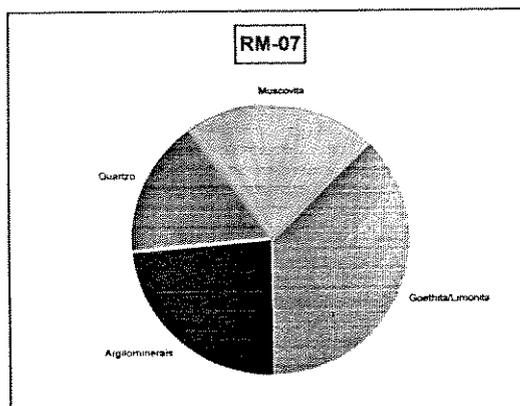


Figura 4.9 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM07 obtida por difratometria de raios-X

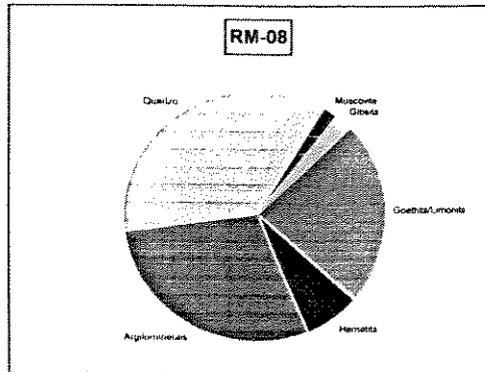


Figura 4.10 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM08 obtida por difratometria de raios-X

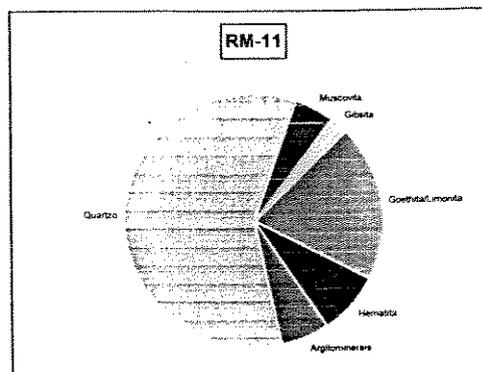


Figura 4.11 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM11 obtida por difratometria de raios-X

A **SEÇÃO II** é constituída pelas curvas das amostras RM12, RM13 (Figura 4.12), RM14 e RM15 (Figura 4.13), coletadas na trincheira TC 11930, no mesmo alvo da seção I (Alvo Cinco Mil), situado a norte da mina. Como as amostras foram coletadas em superfície e em sub-superfície, as curvas espectrais foram colocadas duas a duas para facilitar a visualização dos contrastes espectrais entre as amostras.

Geologicamente, as amostras da SEÇÃO II correspondem a:

- ✦ RM12: quartzo muscovita xisto (QMX), amostrado aproximadamente 1 metro abaixo da superfície;
- ✦ RM13: quartzo muscovita xisto (QMX), amostrado em superfície;
- ✦ RM14: biotita clorita xisto, amostrado aproximadamente 1 metro abaixo da superfície;
- ✦ RM15: biotita clorita xisto, amostrado em superfície.

Novamente, todas as amostras apresentam uma queda brusca entre 400 e 600 nm, indicativa da presença do íon férrico. A amostra RM12 apresenta feição de absorção em 647 nm, indicativa da presença de goetita. No intervalo de 850-950 nm as amostras RM12, RM13, RM14 e RM15 apresentam feição de absorção, respectivamente em 918, 889, 884 e 857. Essas feições indicam a presença de goetita na amostra RM12, goetita e hematita nas amostras RM13 e RM14, além da presença predominante de hematita na amostra RM15. A distribuição relativa dos minerais (Figuras 4.14 à 4.17), confirma a interpretação para as amostras RM12, RM13 e RM15. Na amostra RM14, apesar da curva espectral indicar claramente a presença do íon férrico, os resultados da difratometria de raios-X não confirmam a presença deste íon.

As feições de absorção em 1400, 1900 e 2200 nm, observadas em todas as amostras, diminuem gradativamente da amostra RM12 para a amostra RM15. Nas amostras RM12 e RM13 as feições de absorção em 1400 e 2200 nm são mais intensas do que as observadas nas amostras RM14 e RM15, além do fato de não serem duplas. Isso mostra que a quantidade de sericita-muscovita diminui da amostra RM12 para a amostra RM15 (confirmada pela distribuição relativa dos minerais obtida por difratometria de raios-X). Nas amostras RM14 e RM15 as feições de absorção em 1400 e 2200 nm se tornam duplas, indicando aumento da quantidade de kaolinita. A feição em 1900 nm é provavelmente devida à presença de água nas amostras, porém na amostra RM14 esta feição é mais intensa, estando provavelmente associada à presença de kaolinita.

Associando-se as curvas espectrais com as litologias, podemos concluir que nas amostras de quartzo-muscovita xisto as curvas espectrais indicam o predomínio de goetita e sericita-muscovita, ao passo que na encaixante (biotita-clorita xisto) as curvas espectrais apontam o predomínio de hematita e kaolinita. Nas amostras coletadas em sub-superfície a quantidade dos minerais é maior do que nas amostras dos níveis mais intemperizados, amostrados em superfície. Isso pode refletir assinaturas espectrais distintas nas imagens.

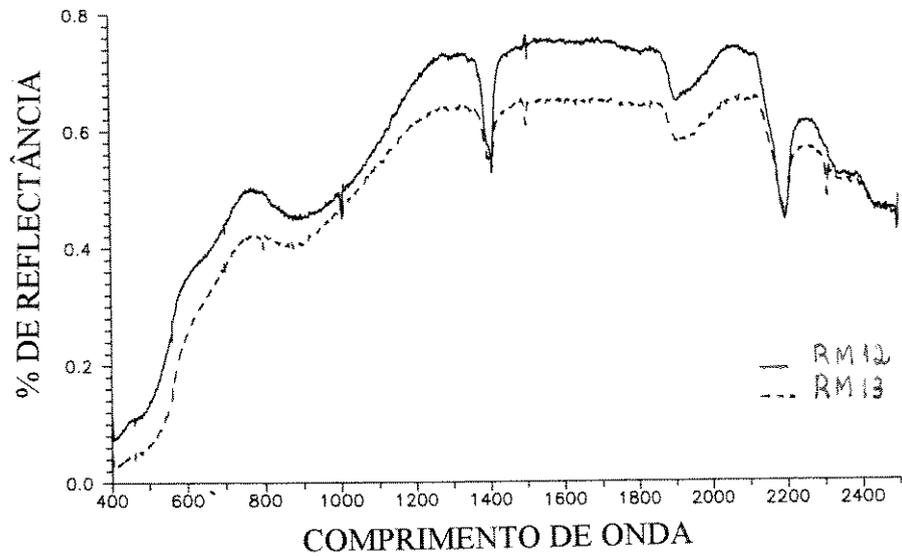


Figura 4.12 - Curvas espectrais das amostras RM12 e RM13

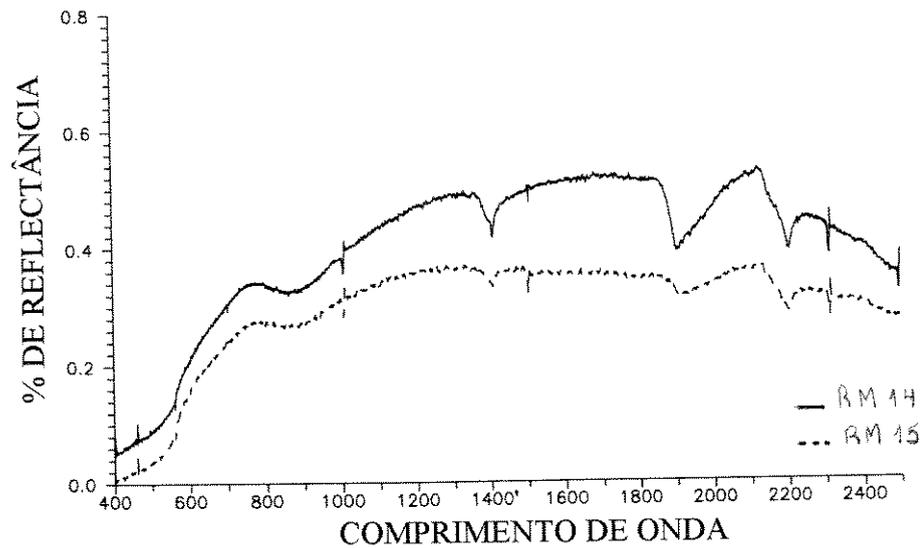


Figura 4.13 - Curvas espectrais das amostras RM14 e RM15

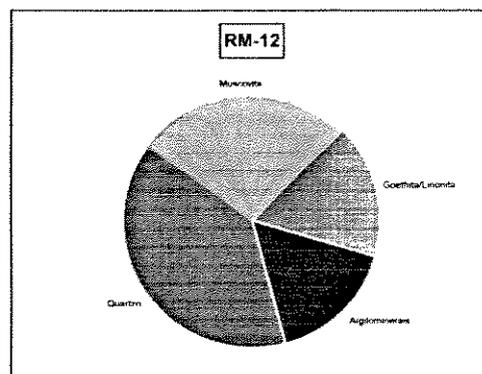


Figura 4.14 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM12 obtida por difratometria de raios-X

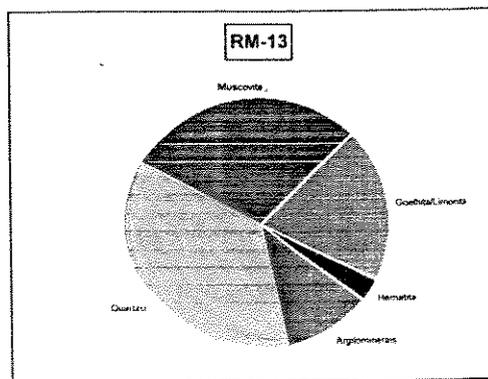


Figura 4.15 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM13 obtida por difratometria de raios-X

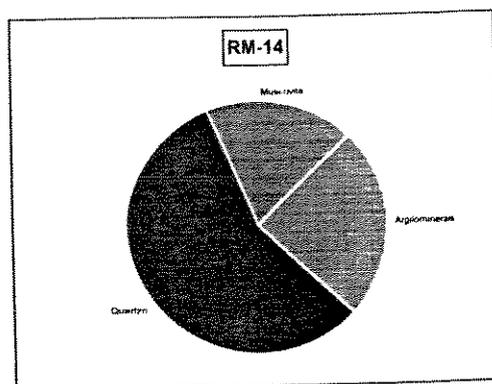


Figura 4.16 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM14 obtida por difratometria de raios-X

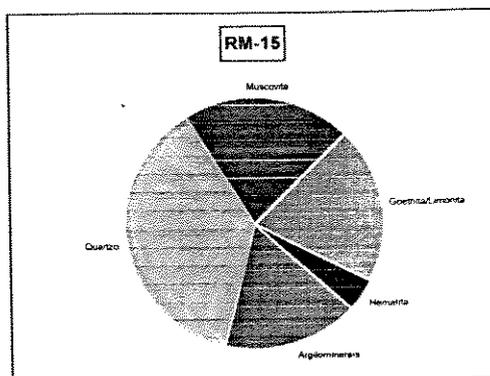


Figura 4.17 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM15 obtida por difratometria de raios-X

A **SEÇÃO III** é representada pelas curvas das amostras RM16, RM17 (Figura 4.18) e RM18, RM19 (Figura 4.19), coletadas na trincheira TML - 13415, localizada no alvo denominado pela DOCEGEO de Mombuca Leste, a norte da mina.

Geologicamente, as amostras da SEÇÃO III correspondem a:

- ✦ RM16: veio de quartzo sacaroide com níveis ricos em Fe, amostrado aproximadamente 2 metros abaixo da superfície;
- ✦ RM17: veio de quartzo sacaroide com níveis ricos em Fe, amostrado em superfície;
- ✦ RM18: clorita xisto, amostrado aproximadamente 2 metros abaixo da superfície;
- ✦ RM19: clorita xisto, amostrado em superfície;

As amostras dessa seção também apresentam uma queda entre 400 e 600 nm, devido à presença do íon férrico. Com exceção da amostra RM19, todas as outras apresentam feição de absorção por volta de 650 nm e no intervalo de 850-950 nm. As amostras RM16, RM17 e RM18 apresentam feição de absorção em 651, 655 e 640, respectivamente. Essa feição por volta de 650 nm nessas amostras está relacionada à presença de goetita (confirmada pelos gráficos com a distribuição relativa dos minerais obtida por difratometria de raios-X - Figuras 4.20 a 4.23). No intervalo de 850 - 950 nm as amostras RM16, RM17 e RM18 apresentam, respectivamente, feição de absorção em 869, 870 e 850. Essas feições estão associadas à ocorrência de hematita em todas as amostras, mascarando as feições de goetita.

As feições de absorção em 1400 e 2200 nm são duplas, indicando a presença de kaolinita em todas as amostras. Na amostra RM18, essas feições de absorção são mais intensas, mostrando que a quantidade de kaolinita é maior do que nas demais amostras (comprovada pela difratometria de raios-X). Na amostra RM16, a grande quantidade de quartzo inibe a identificação de argilo-minerais. Consequentemente, o resultado da curva espectral da amostra RM16 não condiz com o resultado da difratometria de raios-X. Provavelmente, o espectro da amostra RM16 identificou a presença de argilo-minerais e filossilicatos, o que não foi possível com a difratometria de raios-X. As amostras RM17 e RM19 apresentam feição de absorção menos intensas, indicando que a quantidade de kaolinita é menor nessas amostras.

A relação entre as curvas espectrais e a litologia mostra que a quantidade de kaolinita nos clorita xistos é maior que a quantidade encontrada nos veios de quartzo sacaróides.

Além disso, observou-se que a quantidade de kaolinita nas amostras coletadas em superfície (mais intemperizadas) é menor que nas amostras coletadas em subsuperfície. Não foi possível determinar uma relação entre a quantidade de goetita e hematita e as curvas espectrais nesta seção.

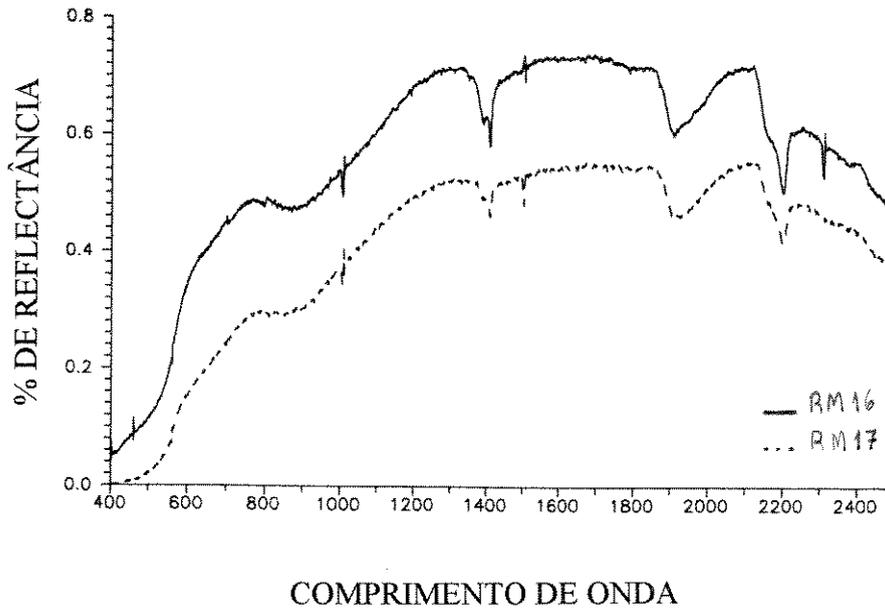


Figura 4.18 - Curvas espectrais das amostras RM16 e RM17

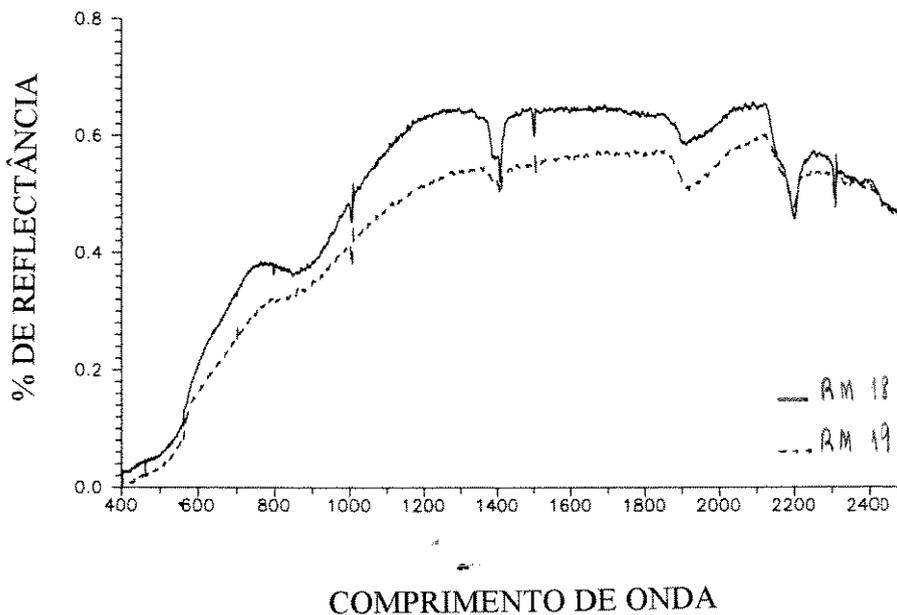


Figura 4.19 - Curvas espectrais das amostras RM18 e RM19

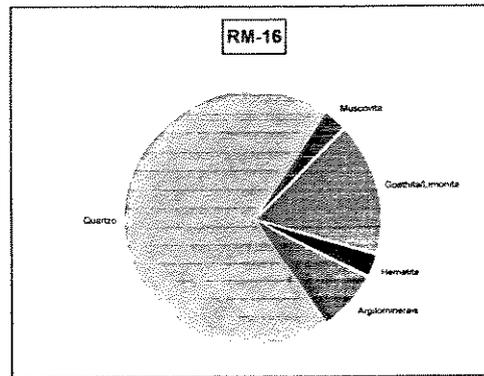


Figura 4.20 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM16 obtida por difratometria de raios-X

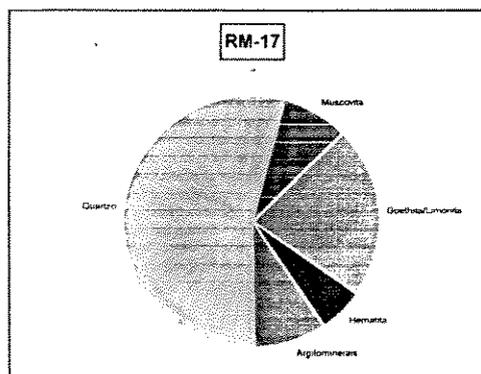


Figura 4.21 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM17 obtida por difratometria de raios-X

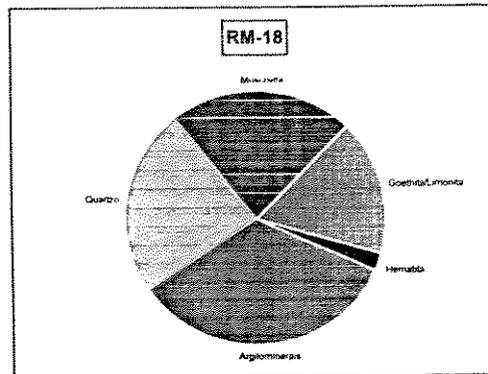


Figura 4.22 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM18 obtida por difratometria de raios-X

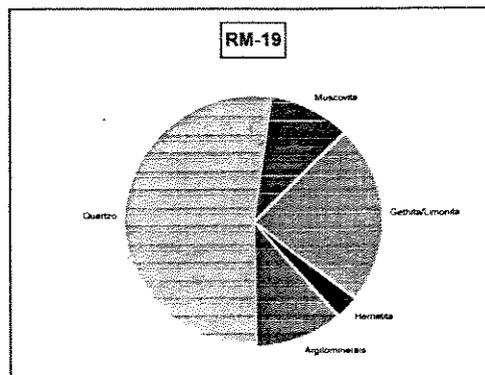


Figura 4.23 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM19 obtida por difratometria de raios-X

A SEÇÃO IV é representada pelas curvas das amostras RM38 (Figura 4.24), RM39 (Figura 4.25), RM40 (Figura 4.26), RM41 (Figura 4.27) e RM42 (Figura 4.28), coletadas na frente de lavra 85N, na porção norte da mina. Essas amostras representam os últimos níveis superficiais existentes da zona mineralizada, pois todo o restante já foi lavrado.

Geologicamente, as amostras da SEÇÃO IV correspondem a:

- ✦ RM38: xisto quartzo feldspático (XQF);
- ✦ RM39: xisto de transição (XT) entre o xisto quartzo feldspático (XQF) e o quartzo muscovita xisto (QMX);
- ✦ RM40: quartzo muscovita xisto (QMX);
- ✦ RM41: xisto de transição (XT) entre o quartzo muscovita xisto (QMX) e o biotita xisto (BX);
- ✦ RM42: biotita xisto (BX).

Mais uma vez as feições de absorção relacionadas à presença do íon férrico estão presentes em todas as amostras, com uma queda brusca entre 400 e 600 nm nas amostras RM38, RM39 e RM40 e uma queda mais suave nas amostras RM41 e RM42. Apenas as amostras RM39 e RM40 apresentam feição de absorção por volta de 650 nm, cujos valores são 650 para a amostra RM39 e 647 nm para a amostra RM40. As demais amostras não apresentam essa feição, pois não têm goetita na sua composição (RM41), ou porque a presença deste mineral está sendo inibida pela presença de hematita (RM38 e RM42). Apesar da difratometria de raios-X (Figuras 4.29 a 4.33) não ter identificado a presença de goetita na amostra RM40, a feição de absorção em 647 nm no espectro desta amostra provavelmente está associada à presença de goetita. No intervalo de 850 - 950 nm as amostras RM38, RM39, RM40, RM41 e RM42 apresentam feição de absorção respectivamente por volta de 881, 944, 906, 865, 862 nm. Esses valores mostram que a hematita está gerando a feição de absorção nas amostras RM38, RM41 e RM42, assim como a goetita nas amostras RM39 e RM40. As inflexões no intervalo de 850 - 950 nm não permitiram uma avaliação quantitativa da presença de goetita e/ou hematita nas amostras desta seção.

As feições de absorção no intervalo de 1400 a 2200 nm estão presentes em todas as amostras da seção IV. As amostras RM39 e RM40 apresentam as feições de absorção mais intensas em 1400 e 2200 nm, indicando que a quantidade de sericita-muscovita nessas amostras é maior que nas demais amostras (o que é confirmado pela difratometria de raios-X). As feições de absorção encontradas em 1900 nm podem estar associadas à presença de kaolinita, podendo também ser devidas à presença de água nas amostras.

Relacionando as feições de absorção com as litologias, conclui-se que a quantidade de sericita-muscovita no quartzo-muscovita xisto é maior que nas demais amostras e que a quantidade de kaolinita é menor na amostra mineralizada do que nas encaixantes.



Figura 4.24 - Curva espectral da amostra RM38

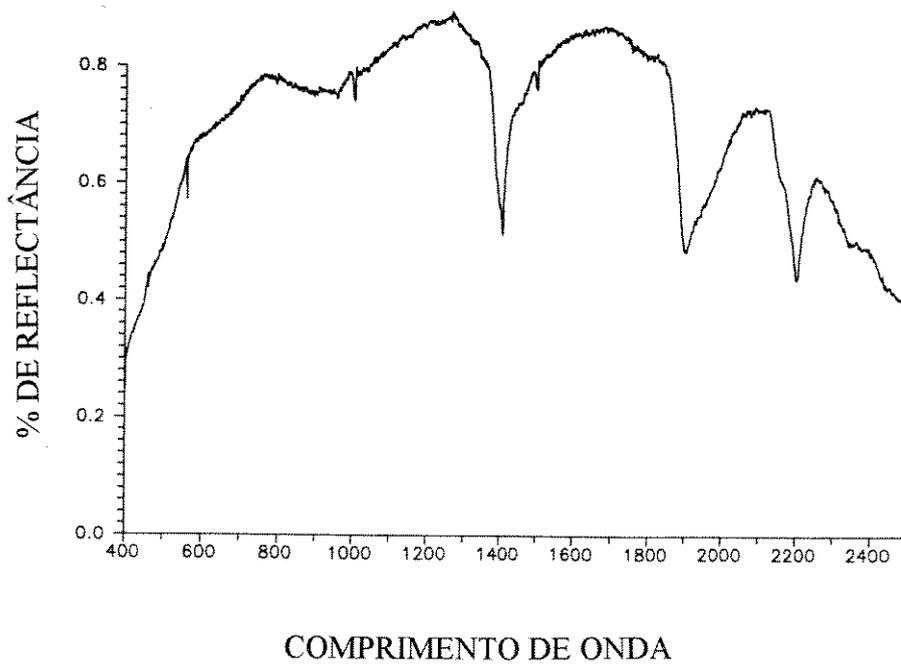


Figura 4.25 - Curva espectral da amostra RM39

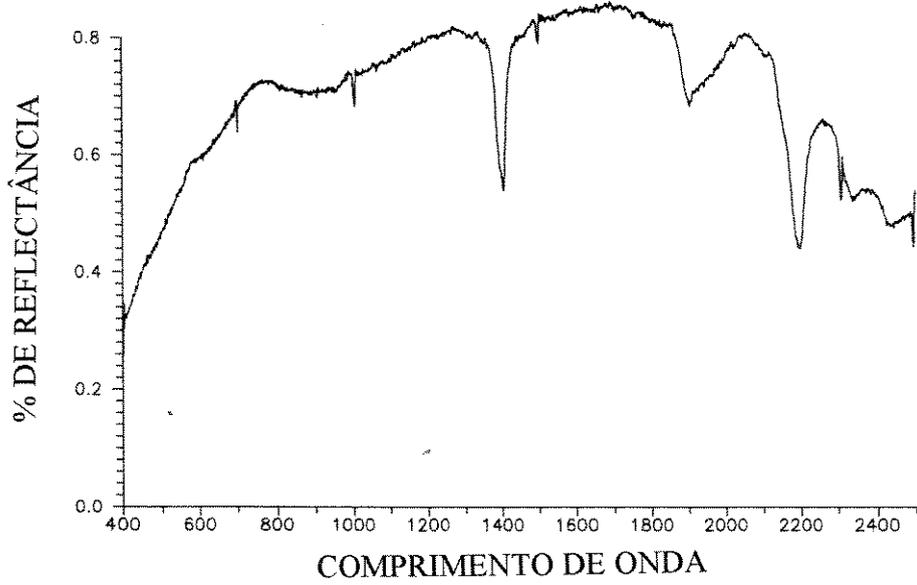


Figura 4.26 - Curva espectral da amostra RM40

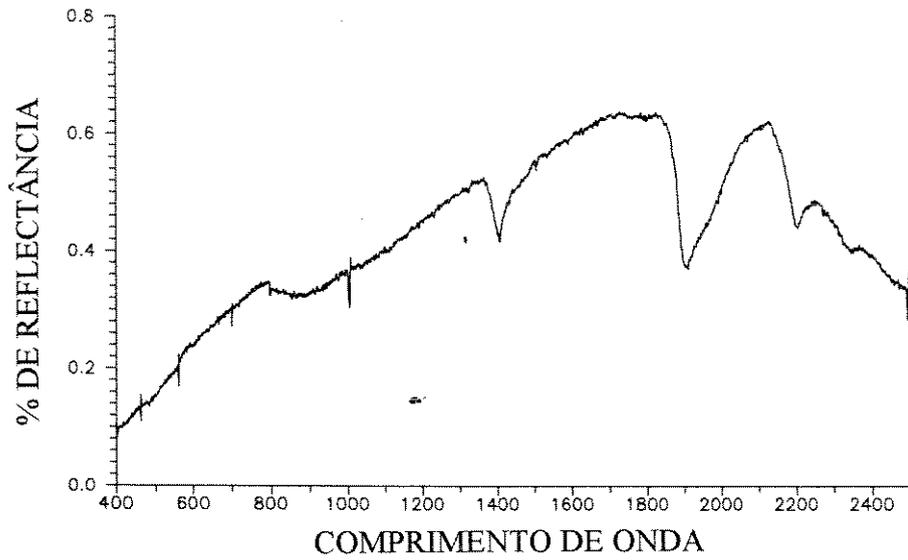


Figura 4.27 - Curva espectral da amostra RM41

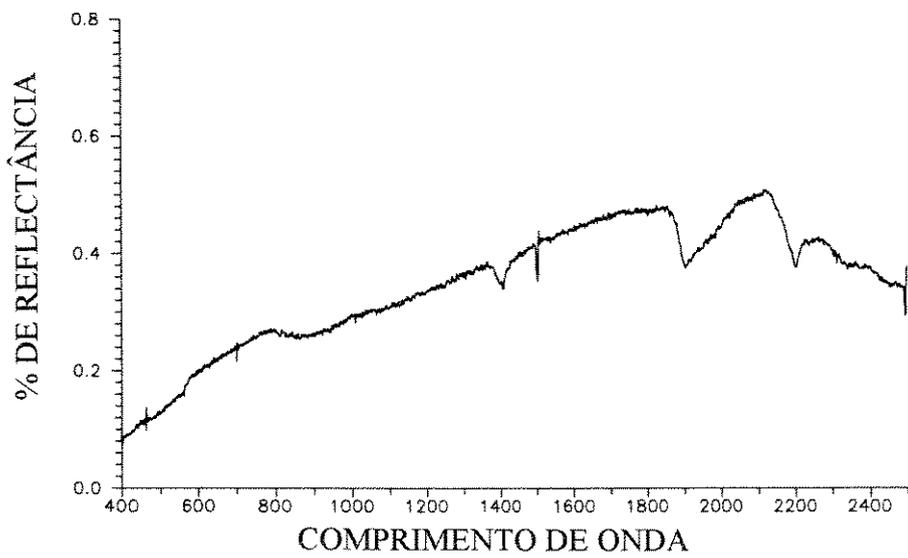


Figura 4.28 - Curva espectral da amostra RM42

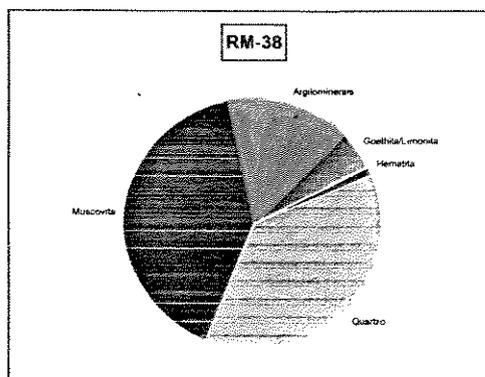


Figura 4.29 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM38 obtida por difratometria de raios-X

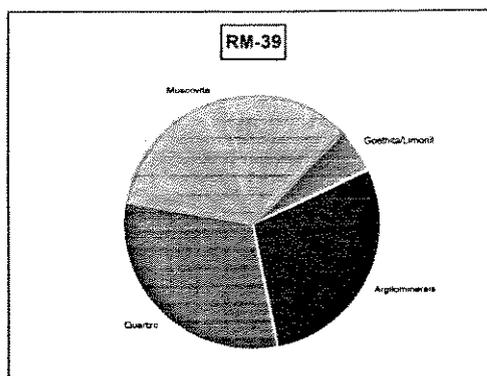


Figura 4.30 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM39 obtida por difratometria de raios-X

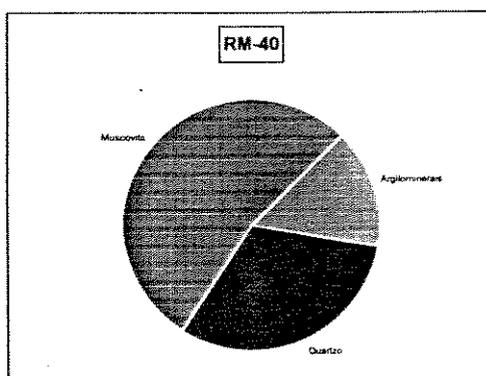


Figura 4.31 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM40 obtida por difratometria de raios-X

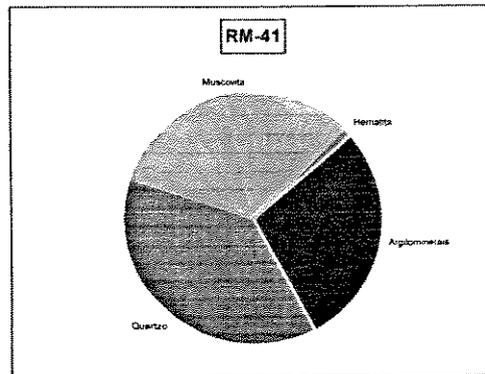


Figura 4.32 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM41 obtida por difratometria de raios-X

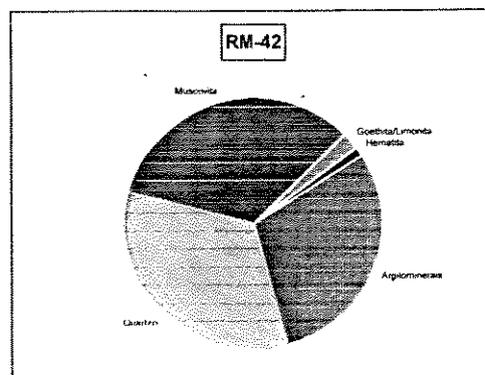


Figura 4.33 - Distribuição relativa dos minerais na amostra RM42 obtida por difratometria de raios-X

4.5 - RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos mostram que, apesar do número de amostras ter sido pequeno, foi possível tecer algumas conclusões a respeito do comportamento espectral das unidades afetadas por processos de alteração hidrotermal na região do Depósito de Riacho dos Machados:

- goetita e sericita-muscovita estão diretamente associadas à zona mineralizada; essa constatação assume grande importância no processamento e interpretação de imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espectral em atividades exploratórias para ouro;

- hematita e kaolinita estão diretamente associadas às rochas encaixantes;

- nas rochas com hematita e goetita, as curvas espectrais mostram feições de absorção relacionadas à hematita, mascarando a presença de goetita;

- os modelos teóricos de deslocamento das feições de absorção da hematita e da goetita no intervalo de 850 - 950 nm foram perfeitamente confirmados nas amostras analisadas.

- os ruídos observados por todo o espectro, resultantes de problemas no equipamento utilizado, embora não tenham impedido, dificultaram a interpretação dos dados no intervalo de 1400 - 2200 nm, limitando a interpretação dos dados relacionados a minerais contendo o radical OH⁻ (sericita-muscovita e kaolinita); pequenas feições de absorção características desses minerais foram obliteradas por esses ruídos;

- a difratometria de raios-X não foi adequadamente realizada para identificação de argilo-minerais, tendo-se observado que a quantidade de quartzo em algumas amostras mascara a presença de argilo-minerais e filossilicatos.

CAPÍTULO 5

PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS GEOSCAN

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o processamento digital de imagens captadas pelo sensor GEOSCAN/AMSS MK-II, em levantamento aerotransportado realizado em 1992 para a DOCEGEO-Geologia e Mineração, na região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados (MG). Este sensor foi projetado para ser usado em pesquisas voltadas à exploração mineral. As imagens geradas apresentam alta resolução espacial (pixels variando de 3-20 metros) e as bandas cobrem pequenos intervalos de comprimento de onda.

Grande parte dos estudos envolvendo a utilização de imagens GEOSCAN se deu em áreas de condições climáticas favoráveis, cujas características, tais como o fraco intemperismo das rochas e ausência de cobertura vegetal densa, potencializam o uso deste tipo de dado. Entretanto, essas condições são muito diferentes de grande parte do território brasileiro, cujo clima sub-tropical a tropical favorece o desenvolvimento de cobertura vegetal e forte intemperismo das rochas. Conseqüentemente, este estudo representa um passo inicial na avaliação dos resultados obtidos com a aplicação de técnicas de processamento de dados GEOSCAN/AMSS para uma área no Brasil.

O levantamento na região de Riacho dos Machados foi realizado à uma altitude aproximada de 2.386 metros, visando obter imagens com resolução espacial de 5 metros, coletando informação espectral em três partes do espectro eletromagnético: VNIR (capta informação relativa a ocorrência em superfície de óxidos/hidróxidos de ferro - bandas 1 à 10), SWIR (capta informação relativa a ocorrência em superfície de argilas e carbonatos - bandas 11 à 18) e TIR (capta informação relativa a ocorrência em superfície de silicatos - bandas 19 à 24).

A área de estudo encontra-se inserida na linha de voo de número 9 do aerolevanteamento, linha esta que engloba o Depósito de Riacho dos Machados. A definição da área exata a ser processada se deu após o cheque dos dados LANDSAT/TM

e da amostragem para estudos de espectrometria de reflexão. Foi definida inicialmente uma imagem de 751x2201 pixels, na qual foram calculados e interpretados os parâmetros estatísticos. Em seguida esta imagem foi cortada e passou a ter dimensões aproximadas de 729X1348 pixels, sendo esta imagem escolhida para se aplicar as técnicas de realce.

Similarmente ao estudo realizado com as imagens LANDSAT/TM, foram aplicadas técnicas convencionais de processamento de imagem, abordadas amplamente na literatura e já referidas anteriormente. Porém, no caso dos dados GEOSCAN/AMSS, as técnicas de processamento digital de imagens foram aplicadas especificamente para realce de minerais de alteração, não sendo aplicadas técnicas específicas para realce litológico e estrutural. Nesse contexto, selecionou-se para este estudo apenas as técnicas de subtração de bandas (modelo de subtrações estabelecido no estudo de Agar, 1994) e Análise por Principais Componentes (adaptação da Técnica Crósta para as imagens GEOSCAN/AMSS).

5.2 - DADOS ESTATÍSTICOS

Da mesma forma que para as imagens LANDSAT/TM, os aspectos estatísticos das imagens GEOSCAN (valores mínimos e máximos de DN, média, desvio padrão, matriz de correlação, matriz de variância e matriz de autovetores) permitem um conhecimento preliminar das informações contidas em cada banda, podendo servir de orientação na definição de quais bandas serão selecionadas para serem processadas.

A Tabela 5.1 apresenta os valores da média e o desvio padrão para todas as bandas do sensor GEOSCAN/AMSS II utilizadas neste estudo. Em todas as 24 bandas foi encontrado um valor de 0 para o DN mínimo e um valor de 255 para o DN máximo. Em muitos casos, esses valores estão associados à presença de ruídos.

As maiores e menores médias encontradas foram:

- ◆ bandas no intervalo do VNIR: a maior média foi encontrada na banda 10 e a menor na banda 1, indicando que a banda 10 é a mais clara e a banda 1 a mais escura;
- ◆ bandas no intervalo do SWIR: a maior média foi encontrada na banda 13 e a menor na banda 17, indicando que a banda 13 é a mais clara e a banda 17 a mais escura;
- ◆ bandas no intervalo do TIR: a maior média foi encontrada na banda 24 e a menor na banda 20, indicando que a banda 24 é a mais clara e a banda 20 a mais escura;

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 6	BANDA 7	BANDA 8
MÉDIA	61.712	73.199	67.781	84.156	96.478	98.352	102.789	99.865
DESVIO PADRÃO	35.302	39.068	38.089	38.073	33.906	30.147	29.612	28.330
	BANDA 9	BANDA 10	BANDA 11	BANDA 12	BANDA 13	BANDA 14	BANDA 15	BANDA 16
MÉDIA	97.590	104.582	84.708	76.520	108.276	100.635	96.756	87.927
DESVIO PADRÃO	26.745	29.253	36.649	36.610	39.099	33.917	36.107	30.833
	BANDA 17	BANDA 18	BANDA 19	BANDA 20	BANDA 21	BANDA 22	BANDA 23	BANDA 24
MÉDIA	70.542	84.649	118.953	102.375	112.267	105.316	109.162	129.532
DESVIO PADRÃO	33.394	32.981	43.184	42.292	35.133	38.671	35.320	39.275

Tabela 5.1 - Valores de média e desvio padrão obtidos para a imagem GEOSCAN/AMSS de Riacho dos Machados

Os valores de desvio padrão mostram que no VNIR a banda 9 é aquela com menor quantidade de informação (maior número de tonalidades de cinza) e a banda 2 é a banda com maior quantidade de informação. No SWIR, os valores do desvio padrão indicam que a banda 16 apresenta menor quantidade de informação e a banda 5 maior quantidade. Já no TIR, a banda 19 apresenta maior quantidade de informação e a banda 21 menor quantidade.

As Tabelas 5.2 (a e b) e 5.3 (a e b) apresentam, respectivamente, os valores da matriz de correlação e os valores da matriz de variância-covariância, calculados através da função de geração de estatística do ER-Mapper.

As Tabelas 5.2 (a e b) mostram que no intervalo do VNIR/SWIR dois pares de bandas com o mesmo coeficiente de correlação apresentam maior correlação entre si, ou seja, um par formado pelas bandas 3 e 4 e outro pelas bandas 7 e 8. As bandas 9 e 17 apresentam a menor correlação entre si. No TIR as bandas 19 e 20 formam o par com maior correlação e as bandas 21 e 24 o par com menor correlação.

Nas Tabelas 5.3 (a e b), a raiz quadrada dos valores correspondentes localizados na diagonal da matriz de variância-covariância representa o desvio padrão de uma banda, ou seja, a banda 2 possui maior variância no intervalo do VNIR (a banda 9 menor), a banda 13 no SWIR (a banda 16 menor) e a banda 19 no TIR (a banda 21 apresenta o menor valor). As bandas 19 e 20 formam o par com maior variância do conjunto total.

CAPITULO 5 - PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS GEOSCAN

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 6	BANDA 7	BANDA 8	BANDA 9	BANDA 10	BANDA 11	BANDA 12
BANDA 1	1.000											
BANDA 2	0.982	1.000										
BANDA 3	0.958	0.982	1.000									
BANDA 4	0.939	0.970	0.993	1.000								
BANDA 5	0.881	0.929	0.932	0.951	1.000							
BANDA 6	0.757	0.812	0.799	0.826	0.955	1.000						
BANDA 7	0.691	0.747	0.727	0.761	0.916	0.990	1.000					
BANDA 8	0.669	0.722	0.699	0.739	0.900	0.979	0.993	1.000				
BANDA 9	0.641	0.691	0.665	0.711	0.875	0.959	0.981	0.992	1.000			
BANDA 10	0.637	0.686	0.660	0.708	0.869	0.947	0.969	0.985	0.990	1.000		
BANDA 11	0.858	0.869	0.899	0.910	0.828	0.686	0.626	0.618	0.603	0.618	1.000	
BANDA 12	0.871	0.885	0.919	0.926	0.840	0.695	0.632	0.621	0.604	0.615	0.989	1.000
BANDA 13	0.858	0.877	0.909	0.926	0.852	0.716	0.658	0.648	0.635	0.645	0.985	0.986
BANDA 14	0.843	0.860	0.891	0.912	0.841	0.710	0.656	0.650	0.640	0.652	0.982	0.980
BANDA 15	0.835	0.849	0.881	0.902	0.824	0.686	0.631	0.627	0.619	0.634	0.983	0.979
BANDA 16	0.853	0.867	0.896	0.914	0.849	0.721	0.668	0.660	0.648	0.658	0.980	0.978
BANDA 17	0.842	0.855	0.883	0.892	0.815	0.679	0.620	0.609	0.593	0.606	0.969	0.965
BANDA 18	0.812	0.822	0.847	0.862	0.800	0.675	0.623	0.615	0.602	0.617	0.950	0.938
BANDA 19	0.393	0.419	0.476	0.530	0.458	0.350	0.333	0.350	0.374	0.390	0.623	0.619
BANDA 20	0.366	0.390	0.449	0.502	0.421	0.306	0.289	0.308	0.332	0.350	0.599	0.597
BANDA 21	0.393	0.418	0.463	0.516	0.465	0.378	0.365	0.379	0.399	0.410	0.597	0.589
BANDA 22	0.468	0.500	0.557	0.607	0.530	0.412	0.385	0.396	0.411	0.425	0.673	0.675
BANDA 23	0.475	0.508	0.558	0.609	0.546	0.440	0.417	0.425	0.438	0.449	0.664	0.666
BANDA 24	0.353	0.377	0.404	0.452	0.425	0.361	0.350	0.359	0.370	0.380	0.485	0.480

Tabela 5.2 (a) - Matriz de correlação (bandas 1 a 12)

CAPÍTULO 5 - PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS GEOSCAN

	BANDA 13	BANDA 14	BANDA 15	BANDA 16	BANDA 17	BANDA 18	BANDA 19	BANDA 20	BANDA 21	BANDA 22	BANDA 23	BANDA 24
BANDA 13	1.000											
BANDA 14	0.991	1.000										
BANDA 15	0.986	0.990	1.000									
BANDA 16	0.986	0.986	0.989	1.000								
BANDA 17	0.957	0.956	0.968	0.972	1.000							
BANDA 18	0.939	0.944	0.957	0.963	0.977	1.000						
BANDA 19	0.660	0.675	0.677	0.644	0.585	0.589	1.000					
BANDA 20	0.634	0.649	0.655	0.617	0.563	0.563	0.988	1.000				
BANDA 21	0.635	0.651	0.647	0.625	0.564	0.579	0.893	0.889	1.000			
BANDA 22	0.713	0.722	0.721	0.692	0.633	0.630	0.965	0.968	0.886	1.000		
BANDA 23	0.708	0.718	0.714	0.692	0.630	0.633	0.925	0.929	0.876	0.962	1.000	
BANDA 24	0.533	0.543	0.533	0.521	0.454	0.468	0.689	0.698	0.688	0.770	0.800	1.000

Tabela 5.2 (b) - Matriz de correlação (bandas 13 a 24)

CAPÍTULO 5 - PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS GEOSCAN

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 6	BANDA 7	BANDA 8	BANDA 9	BANDA 10	BANDA 11	BANDA 12
BANDA 1	1246.249											
BANDA 2	1354.913	1526.339										
BANDA 3	1287.494	1461.050	1450.744									
BANDA 4	1261.956	1443.075	1440.129	1449.541								
BANDA 5	1055.012	1230.378	1203.414	1227.885	1149.588							
BANDA 6	805.982	956.551	916.902	948.319	976.100	908.865						
BANDA 7	722.371	864.106	819.519	858.228	920.110	883.816	876.900					
BANDA 8	669.334	799.209	754.485	797.209	864.391	835.951	833.027	802.616				
BANDA 9	605.084	722.167	677.417	723.577	793.205	772.913	776.797	751.261	715.279			
BANDA 10	657.811	783.572	735.807	788.884	861.883	834.959	839.202	816.033	774.720	855.717		
BANDA 11	1109.691	1244.608	1254.973	1270.189	1028.763	757.738	679.097	641.236	591.404	662.312	1343.142	
BANDA 12	1126.253	1265.484	1280.784	1291.385	1042.821	766.666	684.716	643.668	591.199	658.838	1326.741	
BANDA 13	1184.670	1339.730	1353.172	1378.069	1129.007	843.384	761.726	717.989	663.635	737.477	1411.125	1340.267
BANDA 14	1009.932	1139.543	1151.147	1177.231	966.899	725.497	658.887	624.695	580.770	646.792	1220.066	1412.052
BANDA 15	1064.622	1197.914	1212.192	1239.554	1008.971	746.205	674.922	641.612	597.560	669.473	1300.619	1294.557
BANDA 16	922.234	1037.086	1044.975	1066.005	881.332	666.167	605.890	572.762	530.640	590.035	1100.346	1096.857
BANDA 17	993.181	1114.906	1122.615	1133.490	923.219	683.449	613.120	576.152	529.510	591.940	1185.579	1179.963
BANDA 18	945.111	1058.817	1063.922	1082.938	894.664	671.645	608.381	574.487	530.683	594.920	1147.983	1132.864
BANDA 19	599.638	707.367	782.396	872.076	670.449	455.559	426.175	428.792	431.709	492.733	985.693	978.512
BANDA 20	546.702	645.151	723.185	808.908	603.127	390.460	362.015	368.676	375.997	433.451	928.558	924.674
BANDA 21	487.716	573.910	618.962	690.059	554.295	400.872	380.249	377.103	374.625	421.812	768.671	757.244
BANDA 22	638.291	754.680	820.043	893.415	695.236	479.881	441.445	433.935	424.922	480.285	953.133	955.777
BANDA 23	592.631	700.464	751.017	818.283	654.083	468.785	436.002	425.418	413.940	463.610	860.075	860.873
BANDA 24	489.932	577.820	605.030	676.458	566.158	427.728	407.322	399.780	388.479	436.538	697.967	690.327

Tabela 5.3 (a) - Matriz de covariância (bandas 1 a 12)

	BANDA 13	BANDA 14	BANDA 15	BANDA 16	BANDA 17	BANDA 18	BANDA 19	BANDA 20	BANDA 21	BANDA 22	BANDA 23	BANDA 24
BANDA 13	1528.704											
BANDA 14	1314.096	1150.332										
BANDA 15	1392.639	1211.871	1303.736									
BANDA 16	1180.614	1024.736	1093.692	938.356								
BANDA 17	1249.232	1083.300	1166.659	993.794	1115.163							
BANDA 18	1210.911	1055.633	1139.270	972.950	1076.096	1087.753						
BANDA 19	1113.588	988.452	1055.598	851.714	843.722	839.533	1864.837					
BANDA 20	1048.341	930.582	999.657	799.747	794.552	785.770	1804.814	1788.621				
BANDA 21	872.911	776.252	821.230	672.981	661.685	670.915	1354.274	1320.240	1234.326			
BANDA 22	1078.064	946.508	1006.389	819.575	817.677	803.742	1612.303	1582.974	1203.462	1495.457		
BANDA 23	978.229	860.061	909.942	748.904	743.628	736.935	1411.544	1388.416	1086.454	1314.509	1247.470	
BANDA 24	818.133	723.788	755.772	626.957	595.799	605.985	1168.575	1160.042	949.581	1169.619	1110.152	1542.516

Tabela 5.3 (b) - Matriz de covariância (bandas 13 a 24)

Tendo avaliado o comportamento estatístico das bandas originais, efetuou-se o corte da imagem original com dimensões de 751x2201 pixels (Figura 5.1), de forma a englobar o Depósito de Riacho dos Machados e as anomalias (geoquímicas e geofísicas) caracterizadas pela DOCEGEO a norte da mina. A imagem resultante possui dimensões aproximadas de 729x1348 pixels.

5.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO

Conforme já abordado anteriormente, dados de sensoriamento remoto obtidos por plataformas aerotransportadas são sujeitos a uma série de distorções espaciais. Algumas dessas distorções (item A1.4.2 do Anexo 1) foram corrigidas logo após a realização do levantamento (tan theta, tamanho do pixel e curva sigmóide), porém outras distorções deverão ser eliminadas posteriormente pelo usuário ("roll", "pitch", "yaw", vento e variação na elevação), na fase de pré-processamento das imagens, através da correção geométrica das mesmas. Através desse tipo de correção, pode-se também atribuir às imagens GEOSCAN/AMSS propriedades cartográficas, com projeção definida.

Da mesma forma que para as imagens LANDSAT/TM, o método de correção geométrica inicialmente utilizado para as imagens GEOSCAN/AMSS consistiu em se determinar a relação entre o sistema de coordenadas do tipo UTM da base do IBGE (1:100.000) e da imagem, através da definição de pontos de controle no terreno (GCP - *Ground Control Points*). Porém, em decorrência da grande diferença de escala entre a base cartográfica do IBGE e as imagens GEOSCAN/AMSS (resolução de 5 metros), o erro associado a cada ponto de controle foi muito elevado. Além disso, o erro acumulado foi superior a 300 metros.

O insucesso no método anteriormente citado, fez com que se pensasse em duas alternativas para se realizar a correção geométrica das imagens GEOSCAN/AMSS:

♣ utilizar um GPS (Global Positioning System), que indicaria as coordenadas dos pontos no terreno, visíveis nas imagens, sendo possível então estabelecer as diferenças de posicionamento dos pontos da imagem e das coordenadas obtidas por triangulação de satélites de posicionamento global. A precisão do método estaria relacionada ao posicionamento dos GCPs, feito de forma interativa pelo usuário, e pela disponibilidade de satélites para que as coordenadas obtidas tenham um valor compatível e próximo das imagens GEOSCAN/AMSS. Essa alternativa foi inviável pois o GPS disponível era de mão

e cada ponto apresentava um erro entre 50 e 100 metros, o que acarretaria em um erro acumulado muito elevado.

✦ utilizar a imagem LANDSAT/TM corrigida e realizar uma transformação *imagem a imagem* com a imagem GEOSCAN/AMSS. Este método também não obteve êxito, resultando em uma imagem corrigida com erro acima de 150 metros. Isso deve, provavelmente, ao fato da resolução espacial da imagem corrigida (LANDSAT/TM - 30 metros) ser muito diferente da imagem a ser corrigida (GEOSCAN/AMSS - 5 metros).

Em função das dificuldades encontradas para se efetuar a correção geométrica das imagens GEOSCAN/AMSS, optou-se por aplicar as técnicas de realce nas imagens sem a realização deste tipo de correção.

5.4 - AUMENTOS DE CONTRASTE

Apesar das imagens GEOSCAN/AMSS também apresentarem uma resolução radiométrica de 256 níveis de cinza, que variam de 0 (preto) a branco (255), a informação captada por cada canal frequentemente está espalhada por um número maior de níveis de cinza (histogramas com alto espalhamento), gerando imagens mais contrastadas quando comparadas com as imagens LANDSAT/TM. Mesmo assim, faz-se necessário a aplicação de técnicas de aumento de contraste, para que o intérprete possa visualizar melhor as diferenças radiométricas da imagem.

As técnicas de aumento de contraste usadas compreenderam: aumento linear de contraste e aumento Gaussiano de contraste. O primeiro foi aplicado nas imagens Principais Componentes geradas na Técnica Crósta e o segundo foi aplicado separadamente em cada banda antes de se efetuar a subtração de bandas.

O aumento Gaussiano de contraste foi aplicado para geração de imagens com a mesma média e desvio-padrão. Optou-se por esse aumento de contraste, ao invés do BCET (aplicado nas imagens LANDSAT/TM) pelo fato do último ser mais complexo para ser aplicado, sendo necessário gerar várias imagens e calcular a estatística de cada uma. Isso acarretaria em um tempo maior para o processamento dos dados GEOSCAN/AMSS.

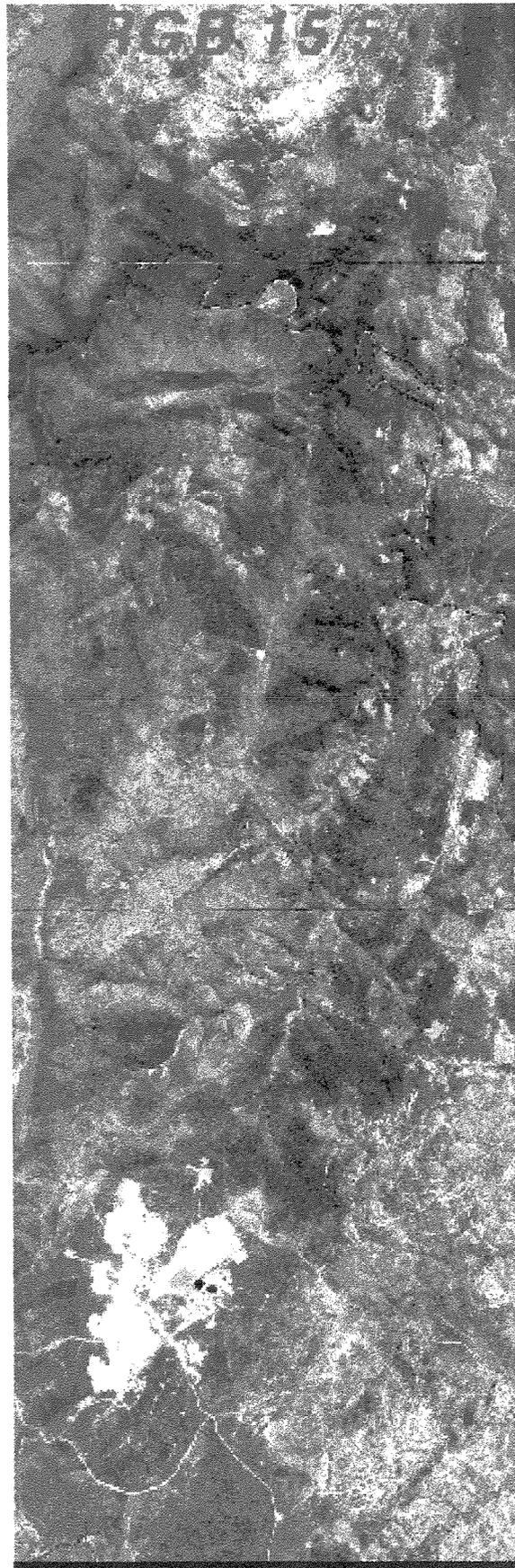


Figura 5.1 - Imagem original GEOSCAN/AMSS com dimensões de 2201x751 pixels (RGB 15/5/1)

5.5 - TÉCNICAS DE PDI APLICADAS À PROSPECÇÃO MINERAL

5.5.1 - INTRODUÇÃO

Imagens GEOSCAN/AMSS têm sido utilizadas com sucesso em trabalhos de prospecção mineral (Honey & Daniels, 1986; Lyon & Honey, 1990; Gunn et al., 1989; Derriman & Agar, 1990; Huntington et al., 1991; Agar, 1992,1994). Esse sucesso está diretamente associado ao fato da resolução espectral e espacial dessas imagens permitir que diferenças espectrais sutis entre minerais, rochas e solos possam ser realçadas. Cabe a cada intérprete definir quais as feições a serem realçadas e quais as bandas que melhor discriminam essas feições.

Nos estudos com as imagens GEOSCAN/AMSS acima mencionados foram utilizadas basicamente as técnicas de subtração de bandas e composições coloridas, permitindo realçar zonas mineralizadas. Outras técnicas mais sofisticadas de processamento digital de imagens, tais como principais componentes, não foram abordadas nesses estudos, pois o sistema de processamento de imagens da GEOSCAN, chamado GIPSI, não contém tais funções.

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são apresentadas curvas espectrais de alguns minerais e rochas nos intervalos de comprimento de onda abrangido por cada banda do sensor AMSS/MKII nas regiões do VNIR, SWIR e TIR, respectivamente. Essas curvas são de grande importância no processo de seleção das bandas a serem aplicadas as técnicas de realce.

Apesar da metodologia de processamento das imagens GEOSCAN/AMSS (abrangendo subtração de bandas e composições coloridas) ter sido estabelecida em condições climáticas diferentes das do Brasil, procurou-se neste estudo adaptar e testá-la para uma área no Brasil. Além disso, tentou-se adaptar a técnica de principais componentes (técnica Crósta), desenvolvida com base nas bandas do LANDSAT/TM, para as bandas do GEOSCAN, pois esta técnica tem obtido bons resultados em trabalhos desenvolvidos no Brasil (Crósta & Rabelo, 1989; Hernandes & Crósta, 1994; Prado & Crósta, 1994).

VISÍVEL E INFRA-VERMELHO PRÓXIMO

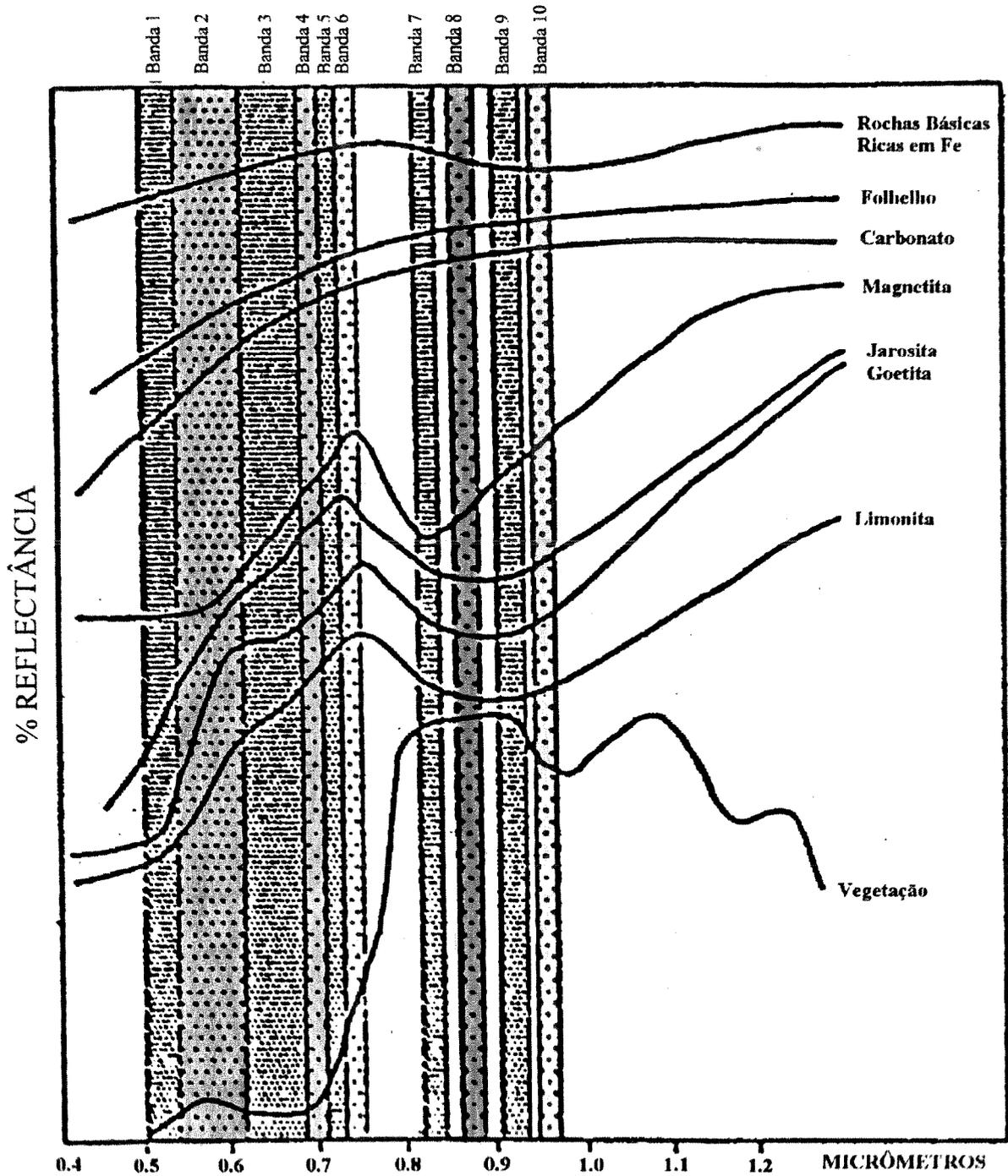


Figura 5.2 - Curvas espectrais de alguns minerais e rochas em relação ao sensor GEOSCAN MKII na porção do espectro eletromagnético VNIR (Agar, 1994)

INFRA-VERMELHO ONDAS-CURTAS

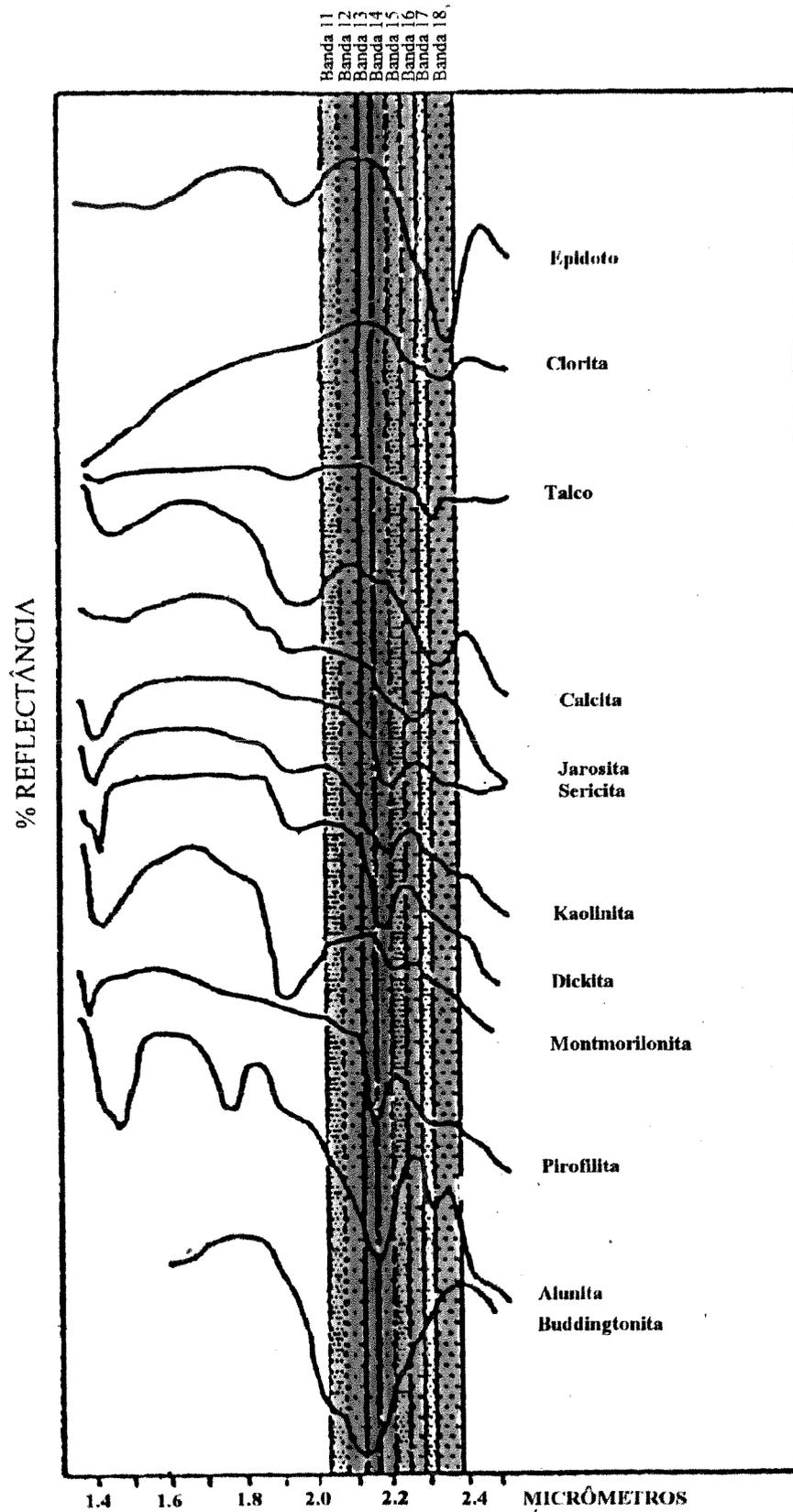


Figura 5.3 - Curvas espectrais de alguns minerais e rochas em relação ao sensor GEOSCAN MKII na porção do espectro eletromagnético SWIR (Agar, 1994)

INFRA-VERMELHO TERMAL

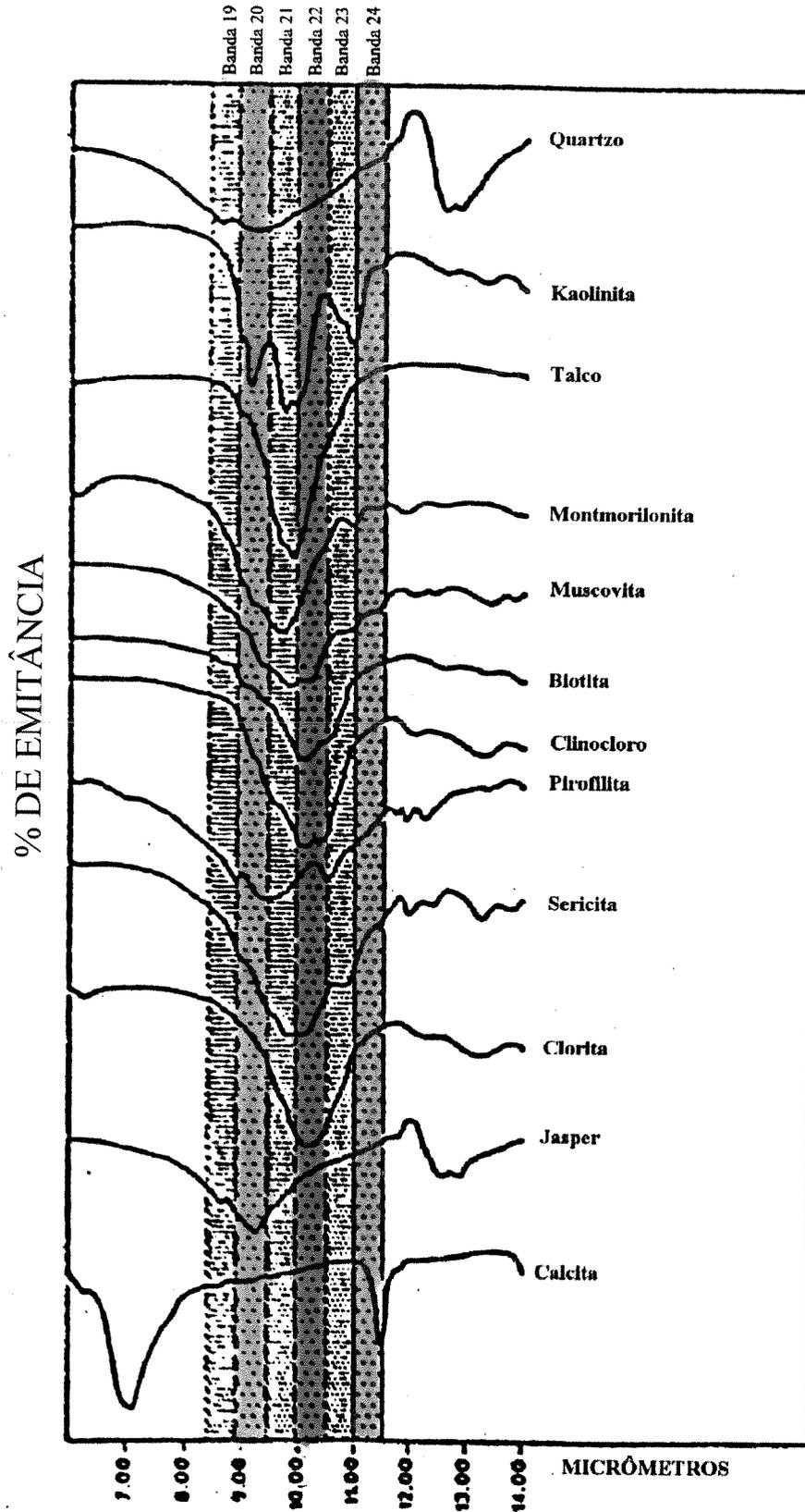


Figura 5.4 - Curvas espectrais de alguns minerais e rochas em relação ao sensor GEOSCAN MKII na porção do espectro eletromagnético TIR (Agar, 1994)

5.5.2 -SUBTRAÇÃO DE BANDAS

Agar (1994) elaborou uma síntese das melhores bandas a serem utilizadas na técnica de subtração para exploração de ouro. Essa seleção das bandas basicamente levou em conta a ocorrência de determinados minerais de alteração hidrotermal, diretamente ligados à mineralização aurífera, tais como: hematita, goethita, limonita, clorita, calcita, sericita, kaolinita, alunita, dickita, buddingtonita, sílica, etc. A grande relevância em se utilizar a metodologia de Agar (1994) no Depósito de Riacho dos Machados, reside no fato de que a mineralização aurífera do depósito estudado (Mina Jilawarra, situada na porção oeste da Austrália) também está associada a uma zona de cisalhamento em terreno geologicamente similar. Conseqüentemente, os métodos exploratórios são parecidos, uma vez que os minerais de alteração associados à mineralização são semelhantes, o mesmo ocorrendo com as respectivas assinaturas espectrais expressas nas imagens.

Agar (1994) utilizou diversas subtrações entre as bandas do sensor GEOSCAN/AMSS MK II no seu estudo, obtendo os seguintes resultados :

- ☛ GSC11-GSC14, GSC11-GSC16, GSC11-GSC18 em RGB: realce da zona de cisalhamento e da mina Jilawarra em branco;
- ☛ GSC13-GSC14, GSC13-GSC15, GSC13-GSC16 em RGB: realce da zona de alteração, onde a zona sericitica aparece em tons brancos e a zona propilitica em tons cyan;
- ☛ GSC2-GSC1, GSC3-GSC2, GSC6-GSC8 em RGB: realce de óxidos de ferro, mostrando hematita em cyan, limonita ou jarosita em branco e goethita em magenta;
- ☛ GSC12-GSC16, GSC12-GSC14, GSC15-GSC17 em RGB: realce de minerais contendo o radical $(OH)^-$, mostrando sericita em amarelo, clorita em magenta e kaolinita em branco;
- ☛ GSC13-GSC11, GSC12-GSC16, GSC12-GSC14 em RGB: realce de minerais contendo o radical $(OH)^-$, mostrando a ocorrência de sericita + kaolinita + clorita em branco, sericita + kaolinita em magenta e sericita + kaolinita + pouca clorita em amarelo.

Das subtrações entre as bandas realizadas por Agar (1994), foram selecionadas as seguintes subtrações para aplicação nas imagens de Riacho dos Machados, na tentativa de se comparar o desempenho da metodologia em clima tropical a subtropical:

- ✱ GSC2-GSC1, GSC3-GSC2, GSC6-GSC8;
- ✱ GSC12-GSC16, GSC12-GSC14, GSC15-GSC17.

Na composição colorida RGB com GSC2-GSC1 no vermelho, GSC3-GSC2 no verde e GSC6-GSC8 no azul (Figura 5.5) para realce de óxidos/hidróxidos de ferro, foi possível visualizar a ocorrência de hematita (tons de cyan), limonita (branco) e goetita (magenta). A identificação desses minerais no Grupo Riacho dos Machados, mais especificamente na Unidade Ouro Fino, permite que sejam definidas áreas-alvo para prospecção, pois a goetita tem uma relação direta com a zona mineralizada, assim como a hematita tem com as rochas encaixantes (Capítulo 4 - item 4.5). O procedimento mais correto para se interpretar essa imagem seria sobrepor os mapas geológicos de detalhe da Unidade Ouro Fino e avaliar a relação entre litologias e minerais identificados na imagem para geração de áreas-alvo.

A composição colorida RGB com GSC12-GSC16 no vermelho, GSC12-GSC14 no verde e GSC15-GSC17 no azul (Figura 5.6) para realce de minerais contendo o radical (OH)⁻ não apresenta uma boa performance na região do Depósito de Riacho dos machados. As bandas do GEOSCAN/AMSS na região do SWIR apresentaram muitos ruídos, o que acarretou em perda considerável de informação durante a aplicação das técnicas de realce. A aplicação de filtros de mediana para remoção desses ruídos também não apresentou bons resultados. Apesar desses problemas operacionais, a composição colorida gerada com essas subtrações apresentou um resultado bom para identificação de sericita (tons amarelados) e clorita (tons de magenta). A identificação de kaolinita, que teoricamente deveria aparecer em tons brancos, não apresentou um bom resultado, não sendo possível caracterizar nessa imagem regiões de ocorrência superficial de kaolinita. Outro problema na interpretação dessa imagem decorre do fato de clorita e sericita estarem diretamente associadas ao intemperismo das rochas da Unidade Ouro Fino. A mesma dificuldade encontrada no trabalho de campo para diferenciar sericita e clorita geradas por processos de alteração hidrotermal, da sericita e clorita geradas por intemperismo das rochas foi encontrada na interpretação dessa imagem. Mais uma vez, um mapa geológico de detalhe sobreposto à essa imagem poderia auxiliar na interpretação das áreas potencialmente favoráveis à mineralização aurífera.



Figura 5.5 - Composição colorida RGB GSC2-GSC1, GSC3-GSC2, GSC6-GSC8



Figura 5.6 - Composição colorida RGB GSC12-GSC16, GSC12-GSC14, GSC15-GSC17

5.5.3 -PRINCIPAIS COMPONENTES (TÉCNICA CRÓSTA)

A técnica Seleção Orientada de Principais Componentes (Crósta & Moore, 1989; Crósta & Rabelo, 1993), também conhecida como *Técnica Crósta* (Loughlin, 1991) foi desenvolvida baseada nas bandas do LANDSAT/TM. Neste estudo, tentou-se adaptar essa técnica para as bandas do GEOSCAN/AMSS, dada a importância que essa técnica pode representar nos trabalhos de exploração geológica. Os aspectos teóricos desta técnica não serão novamente abordados, pois já foram amplamente discutidos no tratamento dos dados LANDSAT/TM.

O passo inicial consistiu em se estabelecer os conjuntos de 4 bandas do sensor GEOSCAN MK-II, sendo cada conjunto definido em função do comportamento espectral de um ou mais minerais de interesse. Os minerais de interesse foram estabelecidos baseado nos resultados obtidos com a interpretação das curvas espectrais das amostras coletadas na região de Riacho dos Machados, curvas obtidas em literatura específica dos dados GEOSCAN/AMSS (Figuras 5.2, 5.3 e 5.4) e levando-se em conta os minerais padrões estabelecidos pela GEOSCAN para Riacho dos Machados: hematita, goetita, clorita/calcita, muscovita-sericita/kaolinita e sílica. Logo, para realçar esses minerais foram estabelecidos os seguintes conjuntos de bandas:

- GSC 1, 6, 7 e 12: realce de hematita;
- GSC 1, 6, 9 e 12: realce de goetita;

- GSC 1, 8, 12 e 18: realce de clorita/calcita;
- GSC 1, 8, 11 e 15: realce de muscovita-sericita/kaolinita;

- GSC 1, 8, 20 e 23: realce de sílica.

Aplicou-se a seguir a técnica de Análise por Principais Componentes (APC) a cada um desses conjuntos, examinando-se os dados estatísticos relativos aos coeficientes dos auto-vetores e relacionando-se esses dados com as curvas espectrais dos minerais de interesse. Da mesma forma que para as imagens LANDSAT/TM, a relação entre os dados estatísticos e as curvas espectrais permite definir qual das imagens Principais Componentes contém a informação de interesse do mineral ou conjunto de minerais.

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os coeficientes dos autovetores para realce de óxidos/hidróxidos de ferro. Analisando-se a contribuição das bandas 6 e 7 para o conjunto 1, 6, 7, 12 (realce de hematita) e bandas 6 e 9 para o conjunto 1, 6, 9, 12 (realce de goetita), conclui-se que nos dois casos a informação desejada se encontra na Principal Componente 4 (PC 4).

COMPONENTES PRINCIPAIS PARA REALCE DE HEMATITA				
	GEOSCAN 1	GEOSCAN 6	GEOSCAN 7	GEOSCAN 12
PC 1	27.57	23.04	21.58	27.82
PC 2	17.21	- 25.31	- 30.14	27.34
PC 3	49.22	- 2.84	- 6.78	- 41.15
PC 4	4.48	- 49.16	45.02	1.34

Tabela 5.4 - Coeficientes dos autovetores para realce de hematita

COMPONENTES PRINCIPAIS PARA REALCE DE GOETITA				
	GEOSCAN 1	GEOSCAN 6	GEOSCAN 9	GEOSCAN 12
PC 1	28.47	23.51	19.10	28.93
PC 2	16.80	- 26.66	-31.00	25.54
PC 3	47.14	1.71	- 9.90	-41.24
PC 4	9.69	- 45.57	43.47	- 1.27

Tabela 5.5 - Coeficientes dos autovetores para realce de goetita

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os coeficientes dos autovetores para realce de minerais com hidroxila. Analisando-se a contribuição das bandas 12 e 18 para o conjunto 1, 8, 12, 18 (realce de clorita/calcita) e bandas 11 e 15 para o conjunto 1, 8, 11 e 15 (realce de muscovita-sericita/kaolinita), conclui-se que nos dois casos a informação desejada também se encontra na Principal Componente 4 (PC 4).

COMPONENTES PRINCIPAIS PARA REALCE DE CLORITA/CALCITA				
	GEOSCAN 1	GEOSCAN 8	GEOSCAN 12	GEOSCAN 18
PC 1	27.39	17.53	29.32	25.76
PC 2	- 2.95	- 57.59	20.44	19.03
PC 3	46.78	- 15.19	- 9.78	- 28.25
PC 4	13.10	- 3.52	- 44.39	38.99

Tabela 5.6 - Coeficientes dos autovetores para realce de clorita/calcita

COMPONENTES PRINCIPAIS PARA REALCE DE MUSCOVITA-SERICITA/KAOLINITA				
	GEOSCAN 1	GEOSCAN 8	GEOSCAN 11	GEOSCAN 15
PC 1	26.37	16.85	28.67	28.11
PC 2	- 6.82	- 54.55	19.90	18.73
PC 3	- 48.01	17.97	13.37	20.65
PC 4	5.18	- 2.49	- 47.38	44.95

Tabela 5.7 - Coeficientes dos autovetores para realce de muscovita-sericita/kaolinita

A Tabela 5.8 apresenta os coeficientes dos autovetores para realce de sílica. Analisando-se a contribuição das bandas 20 e 23 para o conjunto 1, 8, 20 e 23 (realce de sílica), conclui-se que a informação desejada se encontra na Principal Componente 3 (PC 3).

COMPONENTES PRINCIPAIS PARA REALCE DE SÍLICA				
	GEOSCAN 1	GEOSCAN 8	GEOSCAN 20	GEOSCAN 23
PC 1	20.71	15.13	33.59	30.57
PC 2	- 37.15	- 26.60	20.36	15.90
PC 3	9.06	- 9.36	38.15	- 43.42
PC 4	- 33.85	47.78	8.40	- 9.98

Tabela 5.8 - Coeficientes dos autovetores para realce de sílica

As Figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 apresentam, respectivamente, as imagens PCs contendo a informação de hematita, goetita, clorita/calcita, muscovita-sericita/kaolinita e sílica. Em todas essas imagens, a informação relativa à ocorrência desses minerais em superfície aparece em tons claros nas imagens. Nas imagens envolvendo as bandas do SWIR (realce de clorita/calcita(Figura 5.10) e muscovita-sericita/kaolinita (Figura 5.11)) foram aplicados filtros de mediana para suavização dos efeitos causados por ruídos. Observa-se que em todas as imagens foi possível identificar a ocorrência desses minerais no Depósito de Riacho dos Machados. A ocorrência na imagem de outras áreas com pixels claros coincidem com os alvos exploratórios identificados pela DOCEGEO através de outros métodos (geoquímica de superfície, principalmente).

Os resultados das Principais Componentes para identificação de cada mineral de interesse foram sintetizados, da mesma forma que para o LANDSAT/TM, em imagens contendo a informação relativa à ocorrência simultânea de dois minerais. No caso das imagens GEOSCAN/AMSS, as combinações de minerais foram estabelecidas com base na relação encaixante-zona mineralizada, tomando-se como referência os minerais diretamente relacionados com a mineralização aurífera. Logo, foram selecionadas as seguintes combinações:

- ★ goetita e muscovita-sericita/kaolinita
- ★ goetita e clorita/calcita
- ★ goetita e sílica
- ★ muscovita-sericita/kaolinita e sílica

Nessas combinações é possível visualizar numa única imagem, em tons claros, locais de ocorrência simultânea de goetita e muscovita-sericita/kaolinita (Figura 5.13), goetita e clorita/calcita (Figura 5.14), goetita e sílica (Figura 5.15) e muscovita-sericita/kaolinita e sílica (Figura 5.16). Essas áreas são de maior interesse para prospecção aurífera na região do depósito de Riacho dos Machados.

A Figura 5.17 ilustra a confecção de uma composição colorida formada pelas componentes contendo a informação relativa a goetita (canal vermelho), kaolinita (canal verde) e ocorrência simultânea de goetita e kaolinita (canal azul). Observa-se na imagem a ocorrência de goetita em tons de magenta, kaolinita em tons esverdeados e ocorrência simultânea de ambos em pixels brancos (áreas-álvos para prospecção).



Figura 5.8 - PC 4 contendo a informação relacionada à ocorrência de hematita

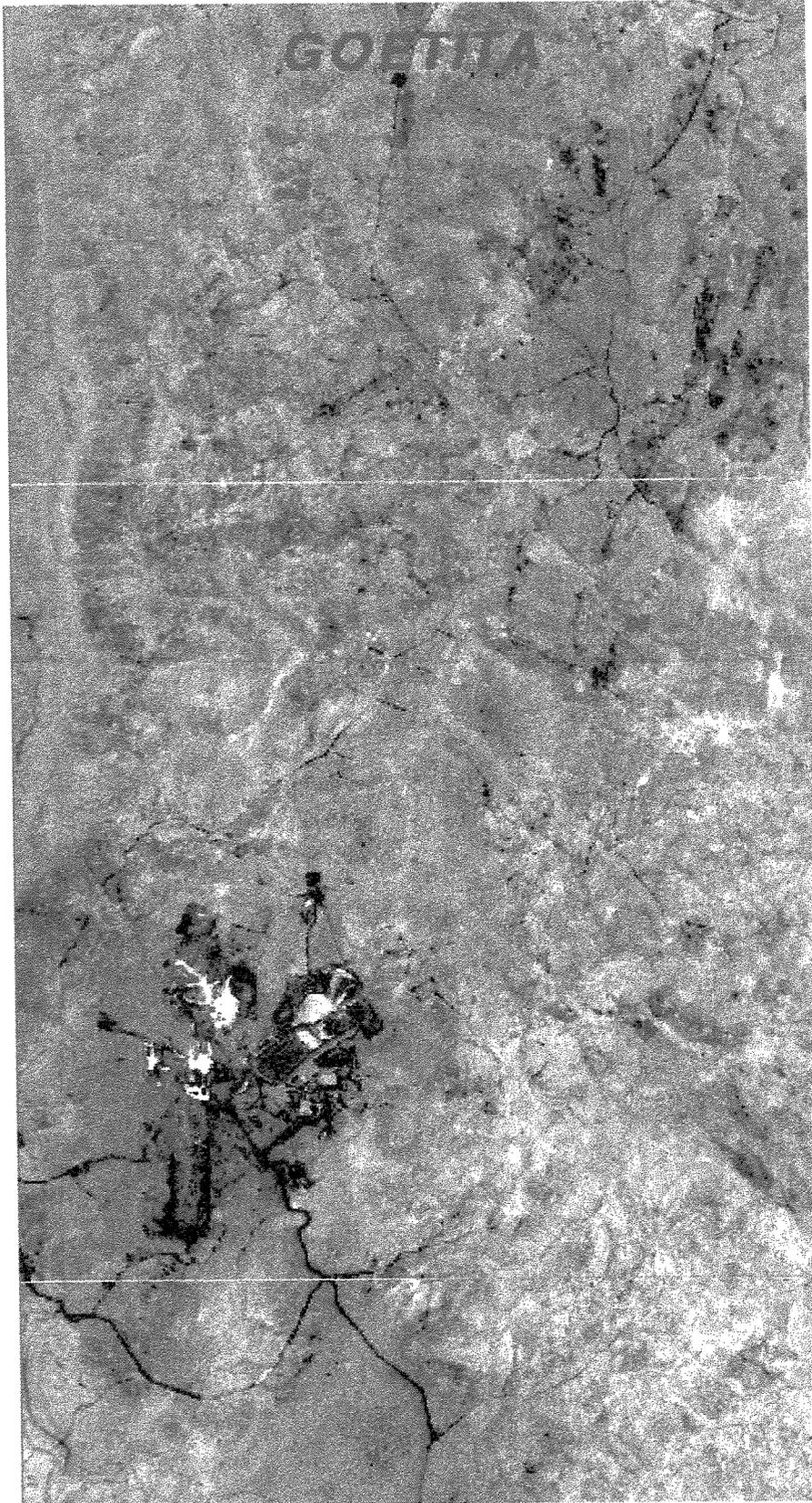


Figura 5.9 - PC 4 contendo a informação relacionada à ocorrência de goetita

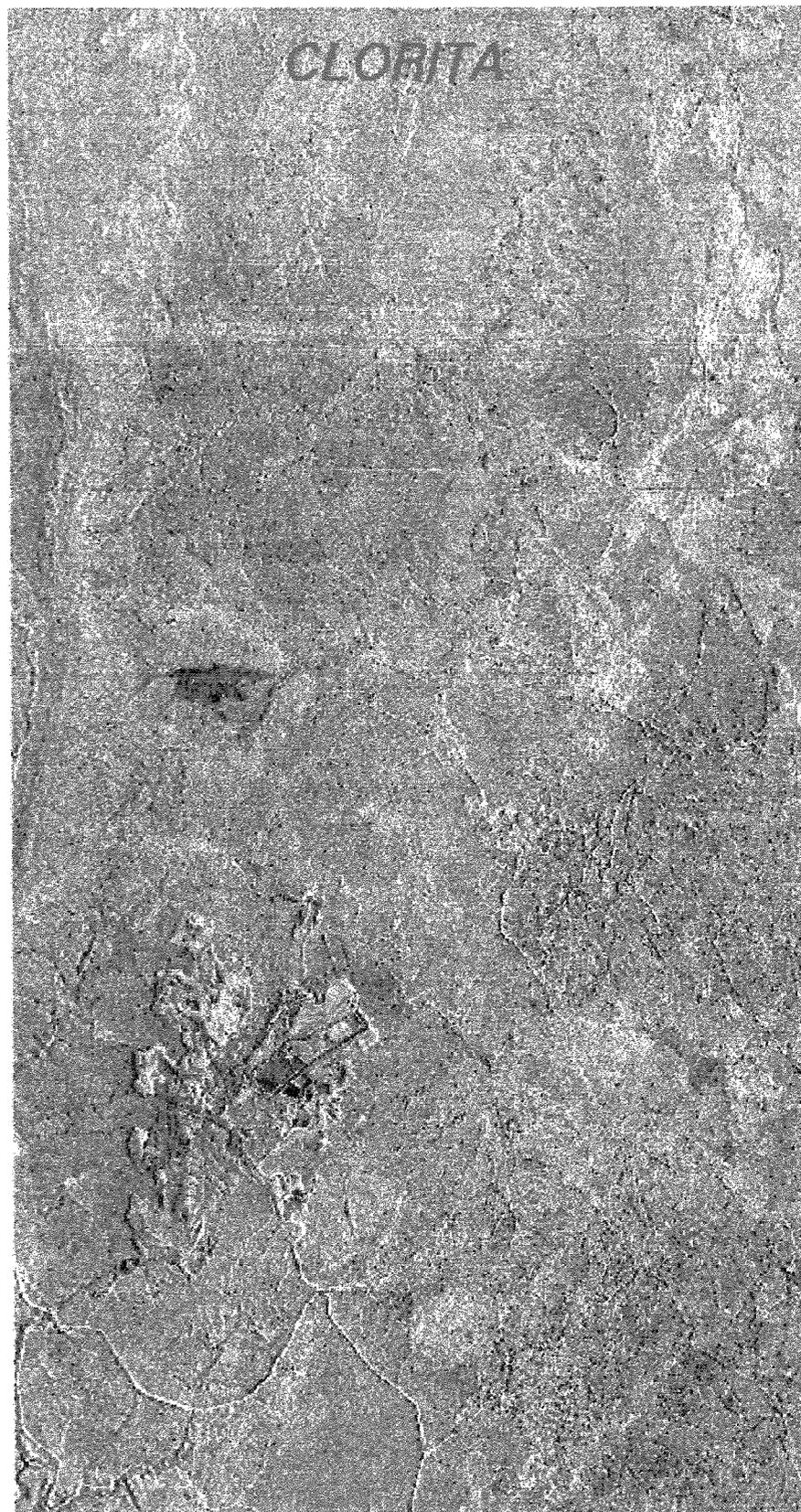


Figura 5.10 - PC 4 contendo a informação relacionada à ocorrência de clorita/calcita



Figura 5.11 - PC 4 contendo a informação relacionada à ocorrência de muscovita-sericita/kaolinita

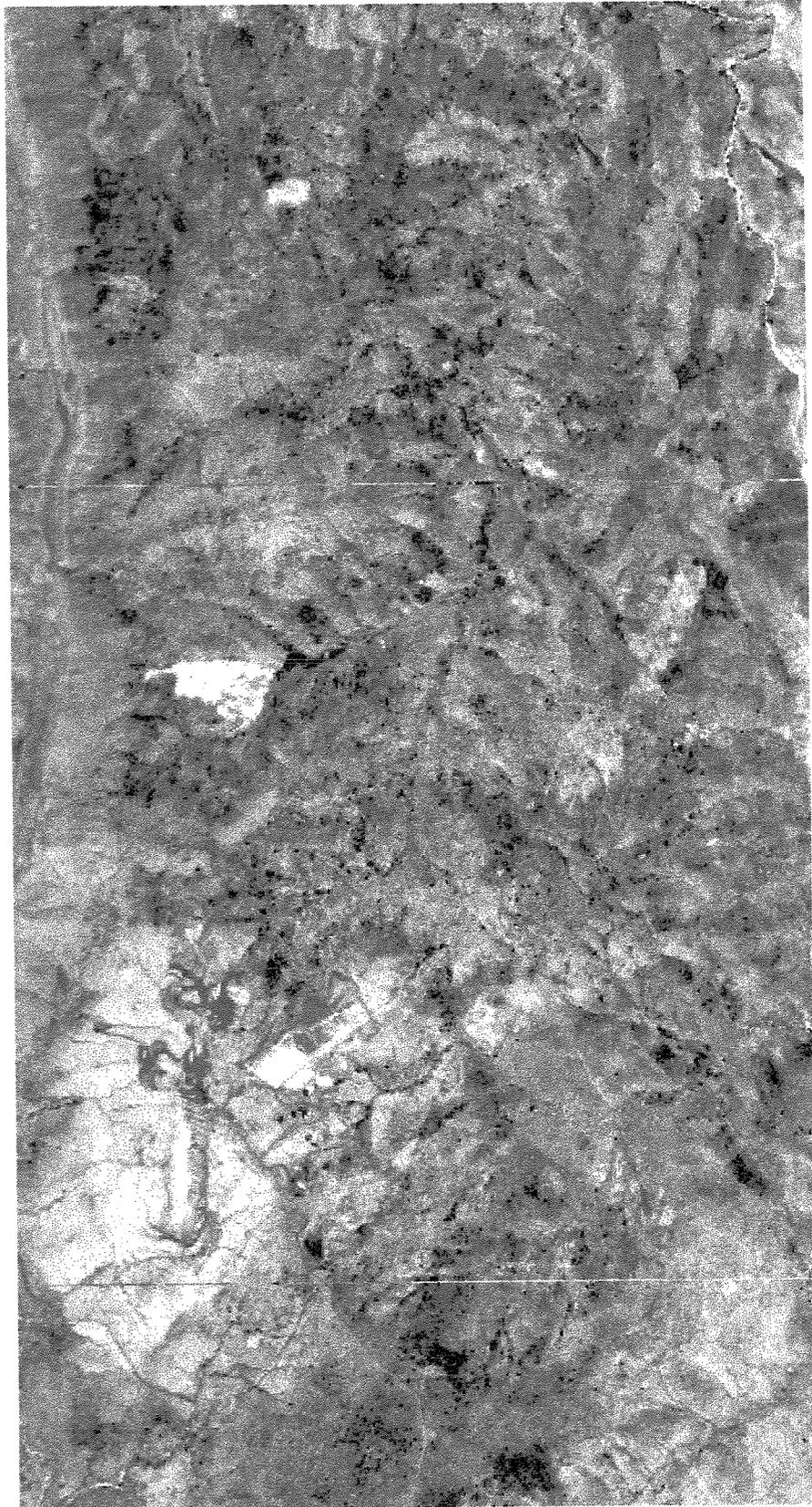


Figura 5.12 -PC 3 contendo a informação relacionada à ocorrência de sílica



Figura 5.13 -PC contendo a informação de goetita e muscovita-sericita/kaolinita

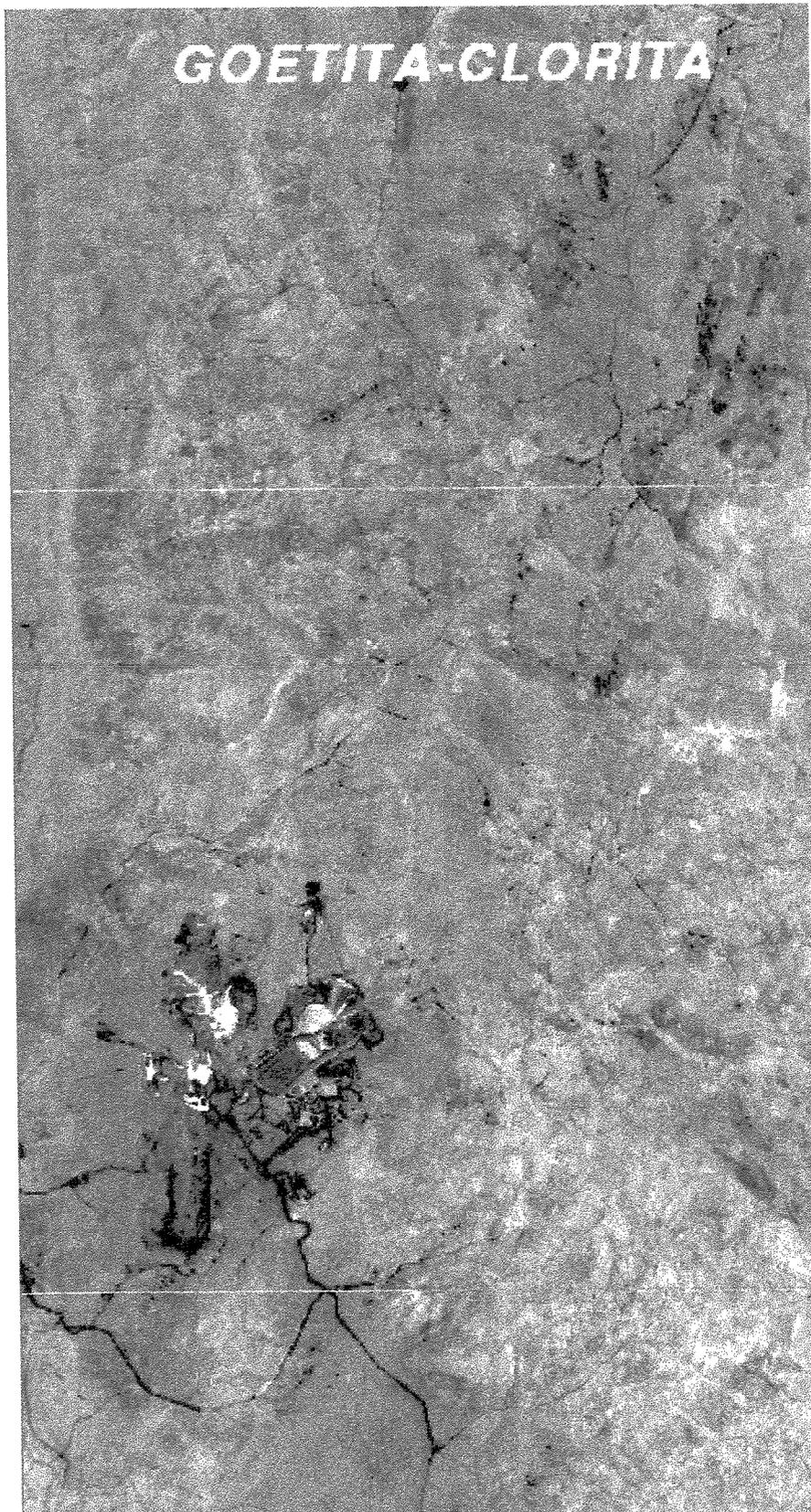


Figura 5.14 -PC contendo a informação de goetita e clorita



Figura 5.15 -PC contendo a informação de goetita e sílica

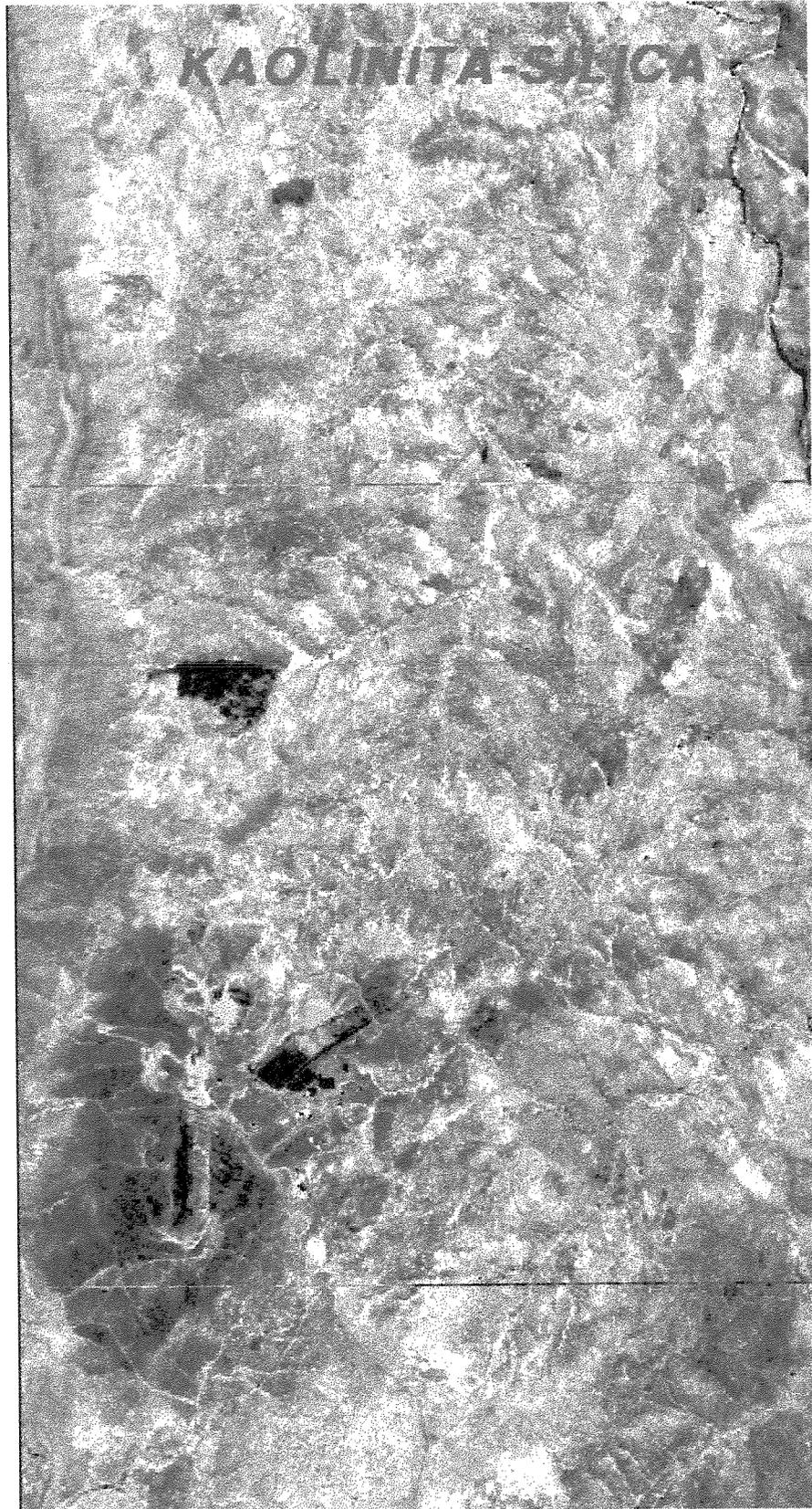


Figura 5.16 -PC contendo a informação de kaolinita e sílica



Figura 5.17 -Composição colorida para realce de goetita e kaolinita

5.5.4 - RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos mostraram que a aplicação de técnicas adequadas de processamento de imagens com maior resolução espectral e espacial pode ser útil em trabalhos de prospecção mineral de ouro associado à alteração hidrotermal. Essas técnicas permitem isolar, extrair e realçar a informação espectral relacionada à ocorrência superficial de assembléias minerais diretamente ligadas a processos de alteração hidrotermal na área de Riacho dos Machados, identificando assim áreas potenciais para trabalhos exploratórios mais detalhados ("follow-up").

As anomalias observadas nas imagens necessitam uma avaliação criteriosa quanto à geologia associada e uma análise da origem do mineral utilizado para caracterizar a anomalia (verificar no campo se o mineral é originado por processos hidrotermais ou intemperismo). Na área de estudo, interessam apenas as áreas localizadas na Unidade Ouro Fino e aquelas onde os minerais índices estejam associados a zonas de alteração hidrotermal, e não a processos intempéricos do tipo superfícies de lateritização e outros.

Apesar do tempo e complexidade de processamento serem maiores na técnica Crósta, esta mostrou um desempenho melhor do que a técnica de subtração de bandas para os objetivos propostos. As imagens geradas com a aplicação desta técnica mostram somente as áreas de interesse, facilitando a interpretação do enorme volume de informações das imagens GEOSCAN/AMSS.

Além dos problemas operacionais para processamento dos dados GEOSCAN/AMSS, tais como manipulação de um enorme volume de dados, eliminação de ruídos nas bandas do SWIR, deparou-se com a falta de um mapa geológico de detalhe para interpretação das imagens geradas. Além disso, o pouco tempo disponível para o processamento e interpretação dos dados inviabilizou a realização de uma etapa de campo longa, que pudesse avaliar com mais segurança as anomalias identificados. Apesar desses problemas, os resultados obtidos dão início ao desenvolvimento de uma rotina de processamento de dados GEOSCAN/AMSS no Brasil, que poderão ser aplicados futuramente em outras regiões onde esses dados forem disponíveis.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A aplicação de técnicas de processamento digital em imagens LANDSAT/TM e GEOSCAN/AMSS, associada à análise de curvas espectrais de amostras coletadas na região do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados, apresentou um desempenho favorável para trabalhos envolvendo mapeamento geológico e exploração mineral.

O tratamento dos dados LANDSAT/TM permitiu que se chegasse às seguintes conclusões:

- os bons resultados obtidos com a aplicação do Método do "Optimum Index Factor" (OIF) para selecionar tripletes de bandas para confecção de composições coloridas demonstraram que a técnica de seleção de atributos pode ser aplicada em áreas adjacentes ao Depósito de Riacho dos Machados, inseridas no mesmo contexto geológico;

- tomando-se como referência o mapa geológico confeccionado pela ECOGEO (1991), foi possível avaliar o desempenho de cada técnica na discriminação das principais unidades litológicas, definindo-se um padrão de qual a melhor imagem para identificar determinada unidade:

- ◆ Complexo Córrego do Cedro ⇨ RGB457 e DCL127;
- ◆ Grupo Riacho dos Machados (Unidade Ouro Fino) ⇨ RGB127 e DCL127;
- ◆ Grupo Riacho dos Machados (Unidade Córrego Rodeador) ⇨ RGB127, RAZÃO (3/1,5/7,4/3) e DCL127;
- ◆ Suíte Pedra do Urubu ⇨ RGB457, SUB (3-1, 5-7,4-3) e PC123;
- ◆ Suíte Paciência ⇨ RGB127, DCL127 e DCL154;
- ◆ Suíte Confisco ⇨ RGB127, DCL127 e DCL154;
- ◆ Grupo Macaúbas ⇨ RGB457, PC123 e DCL154;

- a aplicação de técnicas de PDI para realce estrutural não apresentou bons resultados: o mapa de lineamentos gerado não contribuiu para uma melhoria do arcabouço estrutural apresentado no mapa geológico da ECOGEO (1991); recomenda-se um trabalho específico de mapeamento estrutural utilizando-se fotografias aéreas, imagens LANDSAT/TM e GEOSCAN/AMSS, além de etapas de campo para reconhecimento das principais estruturas em afloramento e associação dessas com estruturas regionais;

- o uso da técnica de subtração de bandas e da técnica Crósta permitiu identificar ocorrências superficiais de minerais relacionados a processos de alteração hidrotermal, constituindo-se numa importante ferramenta de trabalho nos estágios iniciais dos programas de exploração geológica, com possibilidade de redução de custos e agilização da pesquisa;

- comparando-se os resultados da técnica de subtração de bandas e da técnica Crósta, observou-se um desempenho melhor desta última; a subtração de bandas poderia ser aplicada a nível regional para definição de áreas-alvo, ao passo que a técnica Crósta aplicada sobre essas áreas-alvo, uma vez que esta última é mais complexa do ponto de vista computacional.

Os dados de espectrometria de reflexão apresentaram as seguintes conclusões:

- as curvas espectrais das diversas amostras mostram um comportamento espectral diferente entre zona mineralizada e encaixante; as feições de absorção revelam que goetita e sericita-muscovita estão diretamente associados com a zona mineralizada, assim como hematita e kaolinita estão diretamente associadas com as rochas encaixantes;

- o deslocamento da feição de absorção devido ao íon férrico entre 850 e 950 nm em função da mistura hematita-goetita foi observado nas amostras de Riacho dos Machados. Além disso, observou-se um mascaramento das feições da goetita pelas da hematita;

- as feições de absorção relacionadas à minerais contendo o radical OH⁻ (sericita-muscovita e kaolinita) foram prejudicadas por ruídos, que obliteraram feições de absorção menos intensas e pelo fato da difratometria de raios-X não ter sido realizada de forma adequada para identificação desses minerais;

Os dados GEOSCAN/AMSS apresentaram as seguintes conclusões:

⊗ técnicas adequadas de PDI aplicadas em imagens com maior resolução espacial e espectral permitiram realçar a informação espectral relacionada à ocorrência de minerais de alteração hidrotermal em superfície, identificando áreas potenciais para trabalhos exploratórios mais detalhados;

⊗ existe a necessidade de um estudo mais criterioso na Unidade Ouro Fino (hospedeira da mineralização) quanto à origem dos minerais (intemperismo ou alteração hidrotermal) associados às anomalias identificadas nessas imagens;

⊗ da mesma forma que para as imagens LANDSAT/TM, a técnica Crósta apresentou um desempenho melhor que a técnica de subtração de bandas, pois realça somente os minerais de interesse;

⊗ alguns problemas operacionais dificultaram o tratamento e interpretação dos dados GEOSCAN/AMSS, tais como:

✦ necessidade de um espaço livre em disco considerável (cada linha de vôo possui aproximadamente 320 Mb);

✦ as bandas do SWIR (11 à 18) apresentaram ruídos de difícil suavização por filtros convencionais, tais como de mediana;

✦ a falta de um mapa geológico de detalhe da Unidade Ouro Fino dificultou o processo de interpretação das imagens com vistas a trabalhos detalhados de identificação de minerais de interesse;

✦ pouco tempo para o processamento e interpretação das imagens;

Finalmente, conclui-se que a aplicação de técnicas de PDI em imagens LANDSAT/TM e GEOSCAN na região do Depósito de Riacho dos Machados constitui-se numa ferramenta importante nos trabalhos de mapeamento geológico e exploração mineral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M.J.; Ashley, R.P.; Rowan, L.C.; Goetz, A.F.H. & Kahle, A.B. (1977). Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 microns. *Geology*, Vol. 5, p. 713-718.
- Agar, R.A. (1992). Geological applications and limitations of airborne multi-spectral scanners; their availability, cost-effectiveness and future. *Remote Sensing and Spatial Information, the functions, the payback, the future*. 6th Australasian Remote Sensing Conference, Wellington 2, p. 259-273.
- Agar, R.A. (1994). GEOSCAN airborne multi-spectral scanners as applied to exploration for western australian diamond and gold deposits. 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Proceedings, ERIM, San Antonio, Texas, USA, p. 651 - 666
- Alkmim, F.F.; Neves, B.B.B. & Alves, J.A.C. (1992). Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - uma revisão. In: II^o Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Salvador, BA. Edição especial: O Cráton do São Francisco, p. 45-62.
- Almeida, F.F.M. de (1977). O cráton do São francisco. *Rev. Bras. Geoc.*, 7(4):349-364.
- Ashley, R. P. & Abrams, M. J. (1980). Alteration mapping using multispectral images - Cuprite mining district, Esmeralda Country, Nevada. USGS File Report 80 - 367.
- Bettencourt, J.S.; Borges, W.R. & Koritikiake, M. (1991). The Cachoeira Gold Deposit, Gurupi belt, Pará, Brazil: Geological setting, structure and mineralization - A preliminary report. In: LADEIRA, E.A. ed. Symposium *Brazil Gold'91: The Economic Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. Proceedings...Belo Horizonte, 1991. A.A. Balkema, Rotterdam. p. 49-59.
- Chavez Jr., P.S. (1975). Atmospheric, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery. American Society of Photogrammetry, Proceedings of Annual Meeting, Arizona.

- Chavez Jr., P.S. (1982). Staistical method for selecting LANDSAT/MSS ratios. Jour. of Applied Photographic Eng., 8:23-30.
- Costa, M.T. da & Romano, A.W. - 1976 - Mapa geológico do estado de Minas Gerais e texto explicativo (1:1.000.000). Instituto de Geociências Aplicadas. Belo Horizonte.
- Costa, L.A.M.; Baptista, M.B.; Silva, W.G. da; Portela, A.C.P.; Mosmann, R.; Jonhaness, H.S.; Marchetto, C.M.L.; Santos, E.L. dos & Meneguesso, G. (1976). Projeto Leste do Tocantins / Oeste do são Francisco (1:250.000). Relatório Final. Vol. IA. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) / Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) - PROSPEC S.A. Inédito. Rio de Janeiro. 11 v.
- Crósta, A. P. (1990). Mapping of residual soils by remote sensing for mineral exploration in SW Minas Gerais State, Brazil. PhD Thesis, Imperial College, University of London, 452 p.
- Crósta, A.P. (1993). Caracterização Espectral de Minerais de Interesse à Prospecção Mineral e Sua Utilização em Processamento Digital de Imagens. In: Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Vol. 3, p. 202-210.
- Crósta, A.P. (1992). Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 170p.
- Crósta, A. P. & Moore, J. McM. (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. 7th Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Proceedings, ERIM, Calgary, USA, p.1173 -1187
- Crósta, A. P. & Rabelo, A. (1993). Assessing Landsat/TM for hydrothermal alteration mapping in Central-Western Brazil. 9th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Proceedings, ERIM, Pasadena, Califórnia, USA, 9 p.
- Crowley, J.K. (1984). Near-infrared reflectance of zunyite: Implications for field mapping and remote-sensing detection of hydrothermally altered high alumina rocks. Economic Geology, 79:553-557.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Derriman, M.D.J. & Agar, R.A. (1990). Gold and base metal exploration in the Pilbara Craton, Western Australia, using the GEOSCAN Airborne Multi-Spectral Scanner. Proceedings, 5th Australasian Remote Sensing Conference, Perth, 2, pp. 924-927.
- Drummond, J.B.V.; Sperling, E.V. & Raposo, F.O. (1980). Projeto Porteirinha - Monte Azul (1:50.000). Relatório Final. Vol. I. DNPM/CPRM. Inédito, 559 p.
- Drury, S.A. (1987). Image Interpretation in Geology. London. Allen & Unwin, 243 p.
- Drury, S.A. (1989). Remote Sensing Course Book. Open Universiteit. Heerlen, 383 p.
- ECOGEO (1991) - Mapeamento Tectônico-Estrutural da Região de Ouro Fino-Jatobá, Riacho dos Machados (MG). Relatório interno DOCEGEO, 37 p. Inédito.
- ECOGEO (1992) - Mapeamento Tectono-Estrutural em escala 1:50.000 da Região de Riacho dos Machados (MG). Relatório interno DOCEGEO, 145 p. Inédito.
- Elvidge, C.D. & Lyon, R.J.P. (1984). Mapping clay alteration in the Virginia Range - Comstock Lode, Nevada, with airborne thematic mapper imagery. 3th Thematic Conference on Remote sensing for Exploration Geology, Colorado Springs, CO. ERIM, Proceedings, p. 161-170.
- Ferreira Jr, L.G. (1993). Discriminação de produtos de alteração hidrotermal através de espectrorradiometria e análise de imagens digitais TM (Estudo de caso no Greenstone Belt de Guarinos). Dissertação de Mestrado, UnB, 122 p.
- Ferreira Jr et al (1993). Efeitos do intemperismo sobre o comportamento espectral de produtos de alteração hidrotermal. In: Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Vol. 3, p. 28-32.
- Fonseca, E.; Guimarães, P.J.; Leal, E.D. & Medeiros, H.S. (1991). The Ouro Fino Gold Deposit, Minas Gerais, Brasil. In: LADEIRA, E.A. ed. Symposium *Brazil Gold'91: The Economic Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. Proceedings...Belo Horizonte, 1991. A.A. Balkema, Rotterdam. p. 499-505.
- Fonseca, E. (1993). Depósito Aurífero de Riacho dos Machados, Minas Gerais: Hidrotermalismo, Deformação e Mineralização Associados. Dissertação de Mestrado, UFMG, 180 p.

- Fontes, C.Q.; Netto, C.; Costa, M.R.A.; Baltazar, O.F.; Silva, S.L. da & Vieira, V.S. (1978). Projeto Jequitinhonha (1:250.000). Relatório final. Vol. 1. CPRM/DNPM. Inédito. 12 Vol., 543 p.
- Fraser, S.J.; Gabell, A.R., Green, A.A. & Huntington, J.F. (1986). Targeting epithermal alteration and gossans in weathered and vegetated terrains using aircraft scanners: sucessful Australian case histories. 5th Thematic Conference on Remote sensing for Exploration Geology, Reno, Nevada. ERIM, Proceedings, p. 63-84.
- Goetz, A.F.H. (1982). Imaging spectrometry for earth observations. Episodes, 15(1) 7-15.
- Goetz, A.F.H.; Rowan, L.C. & Kingston, M.J. (1982). Mineral identification from orbit: Initial results from the Shuttle Multispectral Infrared Radiometer. Science, 218: 1020-1024.
- Goetz, A.F.H.; Hauff, P.; Shippert, M. & Maecher, A.G. (1991). Rapid detection and identification of OH-bearing minerals in the 0.9-1.0 m region using a new portable field spectrometer. In: Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 8. Denver. Proceedings... Denver, 1-11.
- Grove, C.I.; Hook, S.J. & Paylor II, E.D. (1992). Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers. JPL Publication 92-2, NASA-JET Propulsion Lab, 1992.
- Guimarães, M.L.V.; Crocco-Rodrigues, F.A.; Abreu, F.R. de; Belo de Oliveira, O.A. & Greco, F.M. (1993). Geologia do Bloco Itacambira-Monte Azul entre Barroão e Porteirinha (MG). Anais do IV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - SBG Núcleo MG. Bol. 12:212-216.
- Gunn, M.J.; Honey, F.R.; Lyon, R.J.P. & Furnell, R.G. (1989). GEOSCAN AMSS leads to gold mineralisation at Crossroads, Queensland. Proceedings NQ Gold '89 Conference, Townsville, Australasian Institute of Mining and Metallurgy. p. 139.
- Honey, F.R. & Daniels, J.L. (1986). Rock discrimination and alteration mapping for mineral exploration using the Carr Boyd / GEOSCAN airborne multi-spectral scanner. Proceedings, 5th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. ERIM, Reno, p. 267-278.

- Huckerby, J.A.; Magee, R.; Moore, J.McM. & Coates, D. (1986). Thematic Mapper applied to alteration zone mapping for gold exploration in Southeast Spain. 5th Thematic Conference on Remote sensing for Exploration Geology, Reno, Nevada. ERIM, Proceedings, p. 591-599.
- Hunt, G.R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3) 501-513.
- Hunt, G.R. (1979). Near-infrared (1.3-2.4 m) spectra of alteration minerals - Potential for use in remote sensing. *Geophysics*, 44(12) 1974-1986.
- Hunt, G.R. & Ashley, R.P. (1979). Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared. *Economic Geology*, Vol. 74, pp. 1613-1629.
- Hunt, G.R. & Salisbury, J.W. (1970). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I Silicate Minerals. *Modern Geology*, Vol. 1, pp. 283-300.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W. & Lenhoff, C.H. (1974). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IX Basic and ultrabasic igneous rocks. *Modern Geology*, Vol. 5, pp. 15-22.
- Huntington, J.F.; Craig, M.C.; Churchill, J.N. & Green, A.A. (1991). Airborne mineral mapping with the GERIS and GEOSCAN aircraft scanners for mineral exploration and mapping. Abstracts, *Advances in Mineral Exploration*. 8th ASEG Conference and Exhibition, Australian Society for Exploration Geophysicists, Sydney, pp. 18-21.
- Kaufmann, H. (1988). Mineral exploration along the Aqaba-Levant structure by use of TM data: concepts, processing and results. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, p. 1639-1658.
- King, L.C. (1956). geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geol.*, 18:2, p. 147.
- Kishida, A.; Sena, F.O. & Silva, F.C.A. da (1991) - Rio Itapicuru greenstone belt: Geology and gold mineralization. In: LADEIRA, E.A. ed. *Symposium Brazil Gold'91: The Economic Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. Proceedings...Belo Horizonte, 1991. A.A. Balkema, Rotterdam. p. 49-59.

- Krohn, M.D. (1986). Spectral properties (0.4 to 25 microns) of selected rocks associated with disseminated gold and silver deposits in Nevada and Idaho. *Journal of Geophysical Research*, 91 (B1) 767-783.
- Lamb, A.D. & Pendock, N.E. (1989). Band prediction techniques for the mapping of hydrothermal alteration. 7th Thematic Conference on Remote sensing for Exploration Geology, Calgary, Canada. ERIM, Proceedings.
- Leal, E.D.; Guimarães, P.J. & Silva, H.M. (1989). Projeto Ouro Fino, PE 47. Relatório Final de Pesquisa, Vol I. Rio Doce Geologia e Mineração (DOCEGEO). Belo Horizonte. Inédito. 8 Vol.
- Liu, J.G. (1991). Balance contrast enhancement techniques and its application in image colour composition. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 12, p. 2133-2151.
- Loughlin, W.P. (1991). Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(9): 1163-1169.
- Lyon, R.J.P. & Honey, F.R. (1990). Direct mineral identification (DMI) with GEOSCAN MKII advanced multi-spectral scanner (AMSS). Proceedings, Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Proceedings Series 1298, pp. 50-61.
- Magee, R.W.; Moore, J.McM. & Brunner, J. (1986). Thematic Mapper data applied to mapping hydrothermal alteration in southwest New Mexico. 5th Thematic Conference on Remote sensing for Exploration Geology, Reno, Nevada. ERIM, Proceedings, p. 373-382.
- Mascarenhas, J.F.; Pedreira, A.J.; Misi, A.; Motta, A.C. & Sá, J.H.S. (1984). Província São Francisco. In: Almeida, F.F. de and Hasui, Y. (coord). *O Pré-Cambriano do Brasil*. Ed. Edgar Blücher, São Paulo, Brazil, p. 46-122.
- Mather, P.M. (1987). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*. John Wiley & Sons. Chichester, 1987. 352 p.
- Meneses, P.R. (1986). Avaliação e seleção de bandas do sensor "Thematic Mapper" do LANDSAT-5 para a discriminação de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semi-detalhe. São Paulo. 233 p. (Tese de Doutorado, IG/USP).

- Meneses, P.R.; Assad, E.D. & Sano, E.E. (1991). Introdução ao processamento de imagens digitais de satélites de sensoriamento remoto. 1ª edição, Brasília, Editora Universidade de Brasília. 95 p.
- Meneses, P.R.; Silva, F.H.F; Paradella, W.R. & Ferreira Jr., L.G (1993). O comportamento espectral e radiométrico dos filitos carbonosos portadores de mineralizações auríferas na Faixa Brasília. In: Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Vol. 3, p. 266-274.
- Moore, J. McM. & Liu, J.G. (1990). Image enhancement of epithermal gold deposit alteration zones in southeast Spain. "Remote Sensing: An Operational Technology for the Petroleum and Mineral Industries". Institution of Mining and Metallurgy, London. Proceedings, p. 49-58.
- Novo, E.M.L.M. (1988). Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. São Paulo, Edgar Blucher, 269 p.
- Olivo, G.R.; Marini, O.J. & Giuliani, G. (1991). Hydrothermal gold occurrences hosted by middle to upper Proterozoic carbonate sequence: The example of Santa Rita prospect, Goiás, Brazil. In: LADEIRA, E. A. ed. Symposium Brazil Gold'91: The Economics Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits. Proceedings... Belo Horizonte, 1991. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. p. 339-341.
- Paradella, W.R. (1990). Introdução ao Processamento Digital de Imagens de sensores Remotos aplicados à geologia. São José dos Campos, Instituto de Pesquisas Espaciais.
- Paradella, W.R. (1987). O significado litológico da informação espectral e temporal (sazonal) de dados digitais MSS do satélite LANDSAT-3 para o baixo vale do Rio Curaça, Bahia. Revista Brasileira de Geociências, 16 (2):135-148.
- Podwysoki, M.H.; Segal, D.B. & Abrams, M.J. (1983). Use of multispectral scanner images for assesment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah mining area. economic Geology, Vol. 78, pp. 675-687.
- Raines, G.L.; McGee, L.G. & Sutley, S.J. (1985). Near-infrared spectra of West Shasta gossans compared with true and false gossans from Australia and Saudi Arabia. Economic Geology, 80(8): 2230-2239.

- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. (1983). *The Techniques of Modern Structural Geology*. Vol. 1. Academic Press. London. 307 p.
- Rodrigues, F.A.C.; Guimarães, M.L.V.; Abreu, F.R. de; Oliveira, O.A.B. de & Greco, F.M. (1993). Evolução Tectônica do Bloco Itacambira-Monte Azul entre Barroco e Porteirinha (MG). *Anais do IV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - SBG Núcleo MG*. Bol. 12:74-78.
- Rowan, L.C. (1972). Near infrared iron absorption bands: application to geological mapping and mineral exploration. 4th Annual Earth Resources Program Review, Houston, Texas, p. 60-1 a 60-18.
- Rowan, L.C.; Wetlaufer, P.H.; Goetz, A.F.H.; Billingsley, F.C. & Stewart, J.H. (1974). Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in South-central Nevada by the use of computer enhanced ERTS images. *U.S.G.S. Prof. Paper 883*, 35 p.
- Rowan, L.C.; Goetz, A.F.H. & Ashley, R.P. (1977). Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. *Geophysics*, 42, 522-535.
- Sabins, F.F.Jr. (1987). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. W.H. Freeman and Co., New York, 449 p.
- Sibson, R.H. (1977). Fault rocks and fault mechanism. *J. Geol. Soc. Lond.*, 133(3):191-213.
- Siga Jr., O. (1986). *A Evolução Geotectônica da Porção Nordeste de Minas Gerais, com base em interpretações geocronológicas*. Diss. Mestrado - IG/USP, 140 p.
- Siga Jr., O.; Cordani, U.G.; Kawashita, K.; Basei, M.A.S. & Taylor, P.N. (1987). Aplicação dos isótopos de Sr e Pb nas Rochas Gnáissico-Migmatíticas de Itambira-Barroco. *4º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, SBG*, 45-57.
- Silva, M.V. (1987). *A evolução da pesquisa e do conhecimento geológico no Projeto Riacho dos Machados. Relatório interno. DOCEGEO*. Inédito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Taranik, J.V. (1978). Principales of computer processing of LANDSAT for geological applications. Washington, USGS, 50p. (USGS Open file rept. 78 - 117).
- Turner, F.J. (1981). Metamorphic Petrology, Mineralogical, Field and Tectonic Aspects. 2^{ed}, New York, McGraw-Hill, 523 p.
- Vieira, F.W.R. (1991). Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil. In: LADEIRA, E.A. ed. Symposium Gold'91: The Economic Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits. Proceedings... Belo Horizonte, 1991. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. p. 319-325.
- Vitarello, I. & Galvão, L.S. (1992). Espectroscopia de reflectância e uma nova abordagem estatística para discriminação litológica. In: Congr. Bras. Geol; 37, São Paulo, 1992. Anais... São Paulo, SBG. V. 1, p. 167-168.

ANEXO 1

IMAGENS DIGITAIS E SISTEMAS SENSORES

A1.1 - INTRODUÇÃO

Este anexo tem por objetivo apresentar ao leitor os aspectos teóricos e princípios físicos que regem o sensoriamento remoto e o tratamento de imagens digitais. Além disso, apresentar as principais características dos sensores LANDSAT e GEOSCAN, visto que pesquisas envolvendo o uso de imagens GEOSCAN em território brasileiro são inéditas.

A1.2 - SENSORIAMENTO REMOTO E ESPECTRO DE REFLEXÃO

O sensoriamento remoto pode ser definido como a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, aeronaves, satélites, etc., com o objetivo de estudar a superfície terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética (REM) emitida ou refletida e as substâncias existentes em alvos na superfície (Novo, 1989).

A energia eletromagnética emitida pelo sol incide e se interage com os objetos na superfície terrestre. A energia refletida possui comprimento de onda em função das características físico-químicas dos objetos superficiais, onde os sinais recebidos pelo sensor são convertidos em imagens compatíveis com computadores para posterior utilização em sistemas de Processamento Digital de Imagens (PDI). A Figura A1.1 apresenta de forma esquemática os elementos envolvidos no processo de aquisição de dados.

Apesar da faixa de comprimento de onda em que a REM se propaga ser quase ilimitado, as bandas espectrais dos sensores LANDSAT/TM e GEOSCAN, estão inseridas nas porções do espectro eletromagnético denominadas de visível, infravermelho e termal (Figura A1.2).

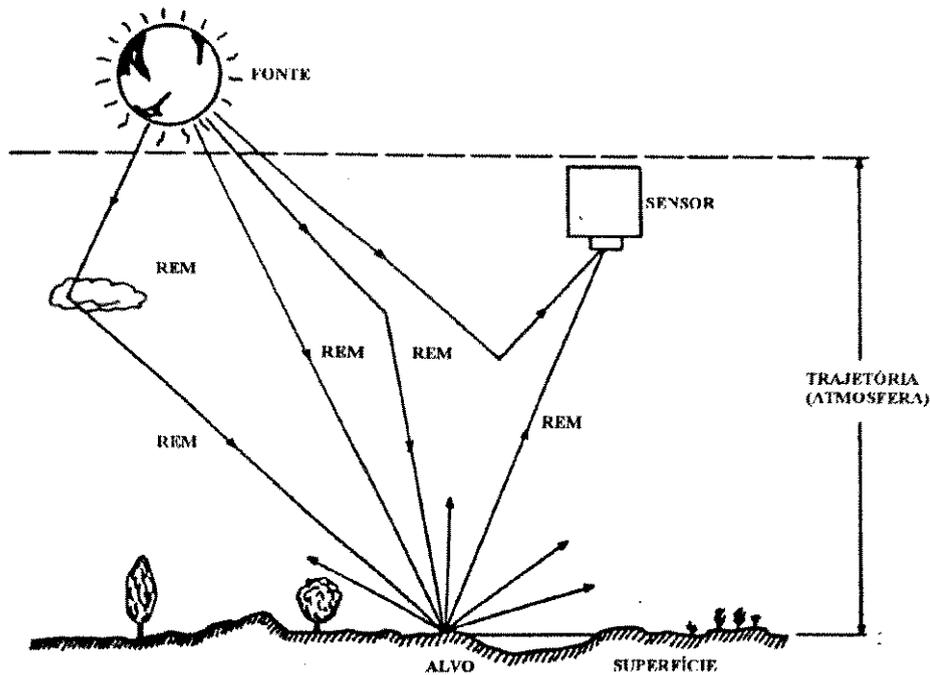


Figura A1.1 - Elementos envolvidos no processo de aquisição de dados (extraído de Paradella, 1990)

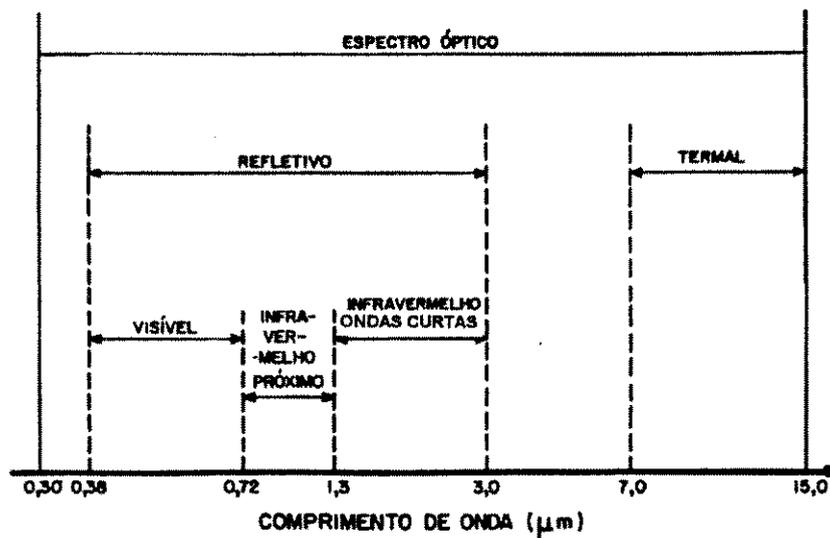


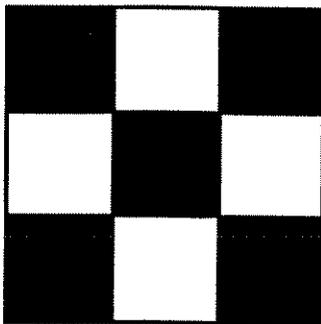
Figura A1.2 - Regiões do espectro eletromagnético (extraído de Novo, 1992)

A1.3 - IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem de sensoriamento remoto pode ser entendida como uma matriz, na qual cada célula (pixel) possui um atributo numérico relacionado à energia eletromagnética

captada pelo sensor (nível de cinza). Os pixels são arranjados em um sistema de coordenadas x e y (linhas e colunas), cuja origem se dá no canto superior esquerdo. A Figura A1.3 ilustra a estrutura de uma imagem.

Além do entendimento da estrutura de uma imagem, faz-se necessário uma compreensão dos aspectos relacionados à resolução espacial, espectral e radiométrica. A resolução espacial caracteriza o potencial de um sensor em discriminar objetos na superfície terrestre. A resolução espectral está associada à quantidade de bandas espectrais de um sensor e largura do intervalo de comprimento de onda abrangido por cada banda. Finalmente, a resolução radiométrica está relacionada ao número de níveis de cinza usados para apresentar os dados coletados por um sensor.



01	254	01
254	01	254
01	254	01

Figura A1.3 - Exemplo de estrutura de uma imagem quadriculada. Cada pixel possui uma posição definida e um DN associado.

A1.4 - SISTEMAS SENSORES

Em sensoriamento remoto, um sistema sensor é definido como qualquer equipamento capaz de captar a radiação eletromagnética refletida e codificá-la em informação da superfície terrestre. Na Figura A1.1 apresentada anteriormente, podemos visualizar de forma esquemática o processo de aquisição de dados por um sensor.

A altitude do sensor em relação ao alvo é conhecida como nível de aquisição de dados. Esse nível de coleta pode ser a nível orbital, nível de aeronave ou nível de laboratório/campo (Figura A1.4). Observa-se que ao passar de um nível para outro, modificam-se as dimensões da área observada, influenciando na resolução espacial do dado obtido. Porém, o custo aumenta progressivamente do nível de campo para o nível orbital.

A aquisição de dados feita a nível de laboratório e campo analisa uma área reduzida da superfície e praticamente não ocorre interferência dos efeitos atmosféricos (o sensor é manipulado por um indivíduo). Quando a aquisição se dá a nível de aeronave a energia recebida pelo sensor não se relaciona a um determinado objeto e sim a um conjunto de objetos, onde à medida que aumentamos a altura de vôo, os efeitos atmosféricos vão atuar de forma muito mais intensa (o sensor é acoplado à uma aeronave). A nível orbital a energia captada pelo sensor é o somatório da resposta espectral de diferentes objetos, tal como a nível orbital, mas o sensor encontra-se acoplado em um satélite.

Neste estudo foram utilizados dados adquiridos a nível orbital (LANDSAT/TM), dados adquiridos a nível de aeronave (GEOSCAN) e dados adquiridos a nível de laboratório (espectrômetro de reflexão).

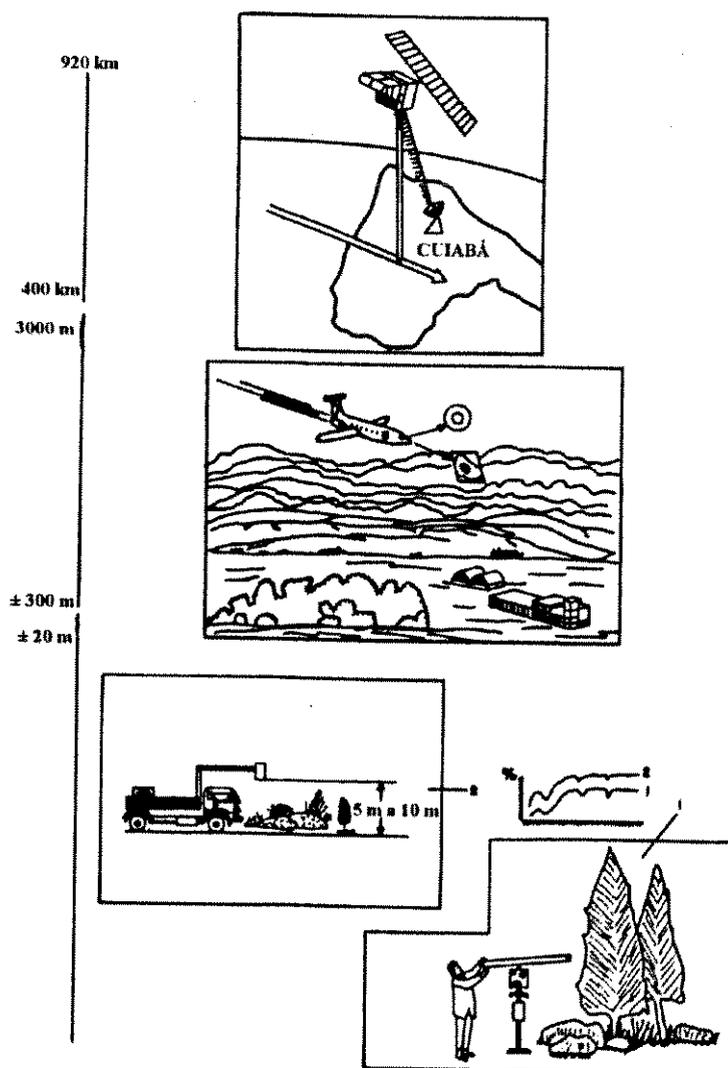


Figura A1.4 - Níveis de aquisição de dados (extraído de Novo, 1992)

A1.4.1 - IMAGEADOR LANDSAT/TM

O Sistema de aquisição de dados LANDSAT, desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), colocou o primeiro satélite em órbita em 1972, denominado ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite -1*). A partir de 1975, com o lançamento do segundo satélite, o programa passou a ser chamado de LANDSAT.

O LANDSAT 1 e o LANDSAT 2 possuíam 2 sistemas sensores com a mesma resolução espacial (80 m), porém diferentes formas de imageamento: *sistema RBV*: sistema semelhante a uma câmera de televisão, imageando instantaneamente uma certa área no terreno (cena); *sistema MSS*: imageamento do terreno se realizava por varredura de linhas.

Em 1978 foi lançado o LANDSAT 3, com a modificação do sistema RBV (dados com melhor resolução espacial) e acréscimo de uma nova faixa espectral ao sistema MSS (região do infravermelho termal).

A partir de 1984, com o lançamento do LANDSAT 4 e do LANDSAT 5, o sistema RBV foi substituído pelo sensor TM (*Thematic Mapper*). Esses novos sensores buscavam dados com maior resolução espectral, maior resolução radiométrica e espacial, além de maior fidelidade geométrica. A Tabela A1.1 apresenta as faixas espectrais cobertas pelo TM e suas respectivas aplicações.

BANDA	INTERVALO DE CADA BANDA	APLICAÇÕES
TM 1	0.45 - 0.52 μm	Mapeamento de superfícies de água e materiais em suspensão., diferenciação entre solo e vegetação, sensibilidade à concentração de clorofila e identificação de Fe^{+3} .
TM 2	0.52 - 0.60 μm	Muito parecida com a banda TM1, porém consegue mapear vegetação sadia, pois a reflectância verde se situa em 0.55 μm .
TM 3	0.63 - 0.69 μm	Banda de absorção da clorofila, portanto significativa na diferenciação de espécies vegetais. Também identifica Fe^{+3} .
TM 4	0.76 - 0.90 μm	Estudos de volume da biomassa e delineação de corpos d'água. Muito utilizada em geologia para identificação de feições estruturais.
TM 5	1.55 - 1.75 μm	Medidas de umidade da vegetação e diferenciação entre neve e nuvens.
TM 6	10.40 - 12.50 μm	Identificação de rochas silicáticas e propriedades termais de solo, rocha, vegetação e água.
TM 7	2.08 - 2.35 μm	Identifica minerais portando hidroxila, sendo potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal. Discrimina também algumas rochas carbonáticas.

Tabela A1.1 - Principais aplicações das bandas do LANDSAT/TM

A1.4.2 - IMAGEADOR GEOSCAN

O sensor GEOSCAN consiste de um Sistema de Varredura Multiespectral Aerotransportado (AMSS - Airborne Multispectral Scanning Systems), cujos receptores são alojados em uma aeronave Cessna 404. Este sensor foi projetado em 1981 para ser utilizado em trabalhos de exploração mineral e monitoramento ambiental. Após dois anos de testes o sensor GEOSCAN MKI entrou em operação, tendo aproximadamente 3 anos de vida útil, sendo então substituído pelo sensor GEOSCAN MKII, que ainda se encontra em atividade. Um problema enfrentado pelo AMSS foi o enorme volume de dados gerados e o fato dos sistemas de processamento de imagens serem, àquela época, caros e de pequeno porte. Os imageadores MKI (13 canais) e MKII (24 canais) foram projetados para cobrir o intervalo do espectro eletromagnético de 0.45 a 12.0 microns , envolvendo as regiões espectrais do visível/infravermelho próximo (VNIR), infravermelho ondas-curtas (SWIR) e infravermelho termal (TIR). A resolução espacial é variável, dependendo sobretudo da altura de vôo (para um levantamento a 3000 metros, a resolução espacial é de 6.4 metros). O campo instantâneo de visada (IFOV) é de 2.1 miliradianos e o campo de visada (FOV) é mais ou menos 46° do ponto nadir A Tabela A1.2 apresenta os intervalos de comprimento de onda abrangido por cada banda dos sensores MKI e MKII e suas respectivas aplicações. Já a Tabela A1.3 mostra o comprimento de onda médio de cada banda do sensor MKII, utilizadas neste estudo.

REGIÃO DO ESPECTRO	BANDAS GEOSCAN		APLICAÇÕES	
	SENsoRES ⇩	MKI		MKII
VNIR (0.4 a 1.0 μm)		1 a 5	1 a 10	Discriminação de óxidos de ferro, feições estruturais, relevo, regiões de plantio e vegetação
SWIR (2.0 a 2.4 μm)		6 a 9	11 a 18	Discriminação de filossilicatos, sulfatos e carbonatos
TIR (8.0 a 12.0 μm)		10 a 13	19 a 24	Discriminação de rochas máficas, ultramáficas, silicificação, skarnitos e feições estruturais

Tabela A1.2 - Principais aplicações das bandas do GEOSCAN

VNIR		SWIR		TIR	
BANDA	COMPRIMENTO DE ONDA MÉDIO (μ)	BANDA	COMPRIMENTO DE ONDA MÉDIO (μ)	BANDA	COMPRIMENTO DE ONDA MÉDIO (μ)
1	0.522	11	2.044	19	8.64
2	0.583	12	2.088	20	9.17
3	0.645	13	2.136	21	9.70
4	0.693	14	2.176	22	10.22
5	0.717	15	2.220	23	10.75
6	0.740	16	2.264	24	11.28
7	0.830	17	2.308		
8	0.873	18	2.352		
9	0.915				
10	0.955				

Tabela A1.3 - Cobertura espectral do GEOSCAN MKII

Como qualquer dado de sensoriamento remoto obtido por plataforma aerotransportada, as imagens adquiridas pelos sensores AMSS MKI e MKII são sujeitas a uma série de distorções espaciais. As principais são: distorção *tan theta*, distorção no tamanho do pixel, curva sigmóide, distorções causadas pelo movimento do avião ("roll", "pitch", "yaw"), distorções causadas pelo vento e variações na elevação do terreno. Algumas dessas distorções são corrigidas logo após a realização do levantamento (*tan theta*, tamanho do pixel e curva sigmóide) e portanto as imagens distribuídas ao usuário já não estão sujeitas às mesmas. Outras distorções são eliminadas posteriormente ("roll", "pitch", "yaw", vento e variação na elevação), na fase de pré-processamento das imagens, através da correção geométrica das mesmas.

Tan theta

À medida em que o sistema de varredura se distancia do ponto NADIR, aumenta o espaçamento dos pixels, que é função direta da tangente do ângulo NADIR. Neste caso, a imagem deve ser reamostrada para que passe a ter um espaçamento de pixel constante. No caso do GEOSCAN/AMSS uma imagem com 768 pixels de largura ("across track"), após a correção *tan theta*, será reamostrada para 990 pixels.

Distorção no tamanho do pixel

Os detetores do GEOSCAN/AMSS capturam dados cujos pixels não apresentam forma quadrada, e sim retangular. O resultado disso é que o "overlap" entre pixels e linhas não é igual. Em consequência, os pixel dobram de tamanho no final da linha imageada e gera-se uma imagem desfocada nas bordas. A correção consiste na aplicação de algoritmos de deconvolução para refocagem da imagem.

Curva sigmóide

O espelho giratório do sensor varre o terreno da esquerda para a direita, com uma velocidade variável segundo uma curva sigmóide. Isso deve ser corrigido para que as imagens apresentem pixels quadrados.

Correções de movimento do avião ("roll", "pitch" e "yaw")

Essas distorções e as imagens resultantes são ilustradas na Figura A1.5.

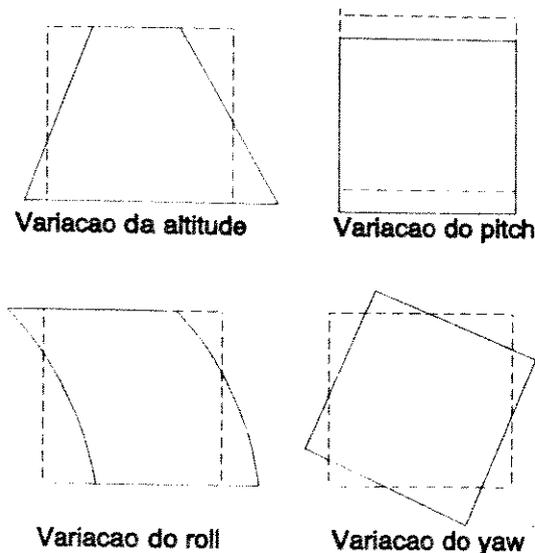


Figura A1.5 - Distorções de roll, pitch e yaw

Distorções causadas pelo vento

A aeronave deve voar em uma direção com pequeno ângulo em relação a direção pretendida, para compensar os efeitos do vento. Quando este ângulo não é o correto, ocorrem distorções. A correção consiste em se determinar o ângulo exato entre a direção do vento e a direção pretendida.

Variações na elevação do terreno

Diferenças topográficas entre diferentes pontos da superfície podem variar de 200 a 1000 metros. Isso faz com que as imagens não tenham uma resolução espacial constante. A solução consiste em se acoplar na aeronave um radar altímetro, que permite que as oscilações na superfície do terreno sejam registradas e posteriormente corrigidas.

ANEXO 2

CONFECCÃO DE CARTAS-IMAGEM

A função *map composition overlay* permite estabelecer todos os parâmetros do grid, da escala, do título e das legendas, sendo os mesmos salvos em um arquivo, no formato vetor, podendo ser sobreposto em qualquer imagem produto gerada no formato raster. A Figura A2.1 ilustra as opções dadas pelo programa ER-Mapper (versão 4.0) para definição de grids.

Grid

Item

“Grid/ENGrid” and “Grid/LatLongGrid”

Parameters

The editable parameters are:

- Color: default - grey
- GridStyle: Options - full or tick grid; default - full grid
- GridSpacingX: Options - Variable or selection from 10 m to 1000 km; default variable
- GridSpacingY: as for GridSpacing X
- LabelsAtLeft - tick box: default - yes
- LabelsAtTop - tick box: default - yes
- LabelsAtRight - tick box: default - no
- LabelsAtBottom - tick box: default - no
- LabelsFont: default - Helvetica
- MinLabelsPointSize: default - 8 points
- MaxLabelsPointSize: default - 12 points
- LabelSpacing: 2
- TickLength: default - 9 points
- TickLineThickness: default - 2 points
- GridLineThickness: default - 1 point

Figura A2.1 - Parâmetros oferecidos pelo programa ER-Mapper para definição de grids

A função *annotation overlay* permite que se trace sobre a imagem digital os principais contatos geológicos e estruturais, diretamente na tela do sistema, utilizando os recursos de desenho interativo do programa. Esses recursos funcionam de forma simples, através de interface gráfica composta por ícones e menus, ativados via mouse. A Figura A2.2 ilustra a tela de edição desta função.

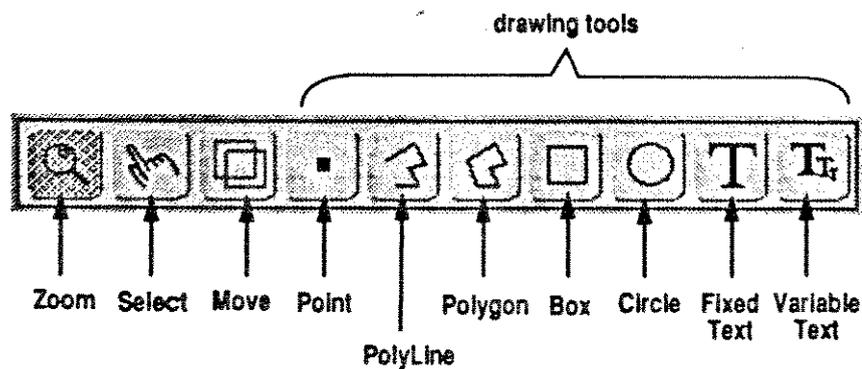
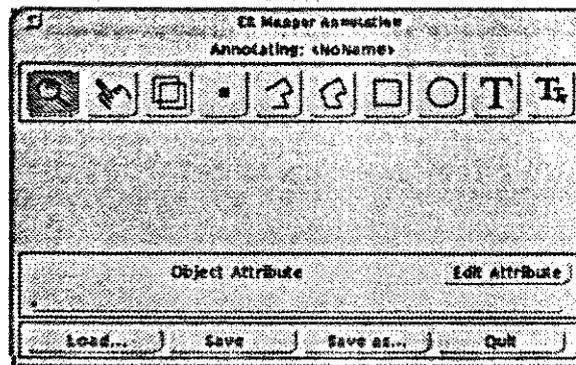
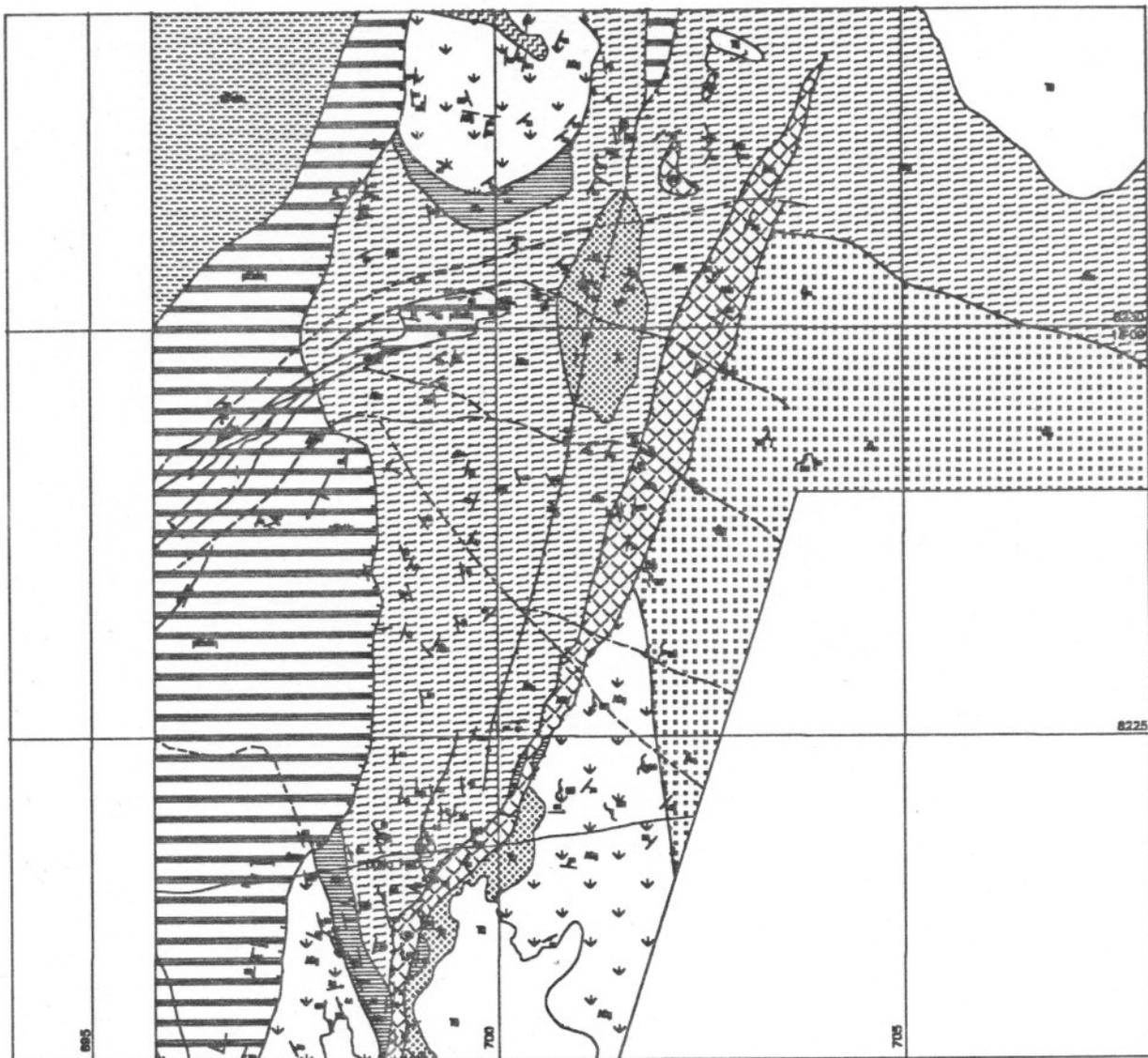


Figura A2.2 Comandos do recurso *annotation overlay*



O LIMITE SUPERIOR DESTE MAPA COINCIDE COM O LIMITE
SUPERIOR DAS IMAGENS LANDSAT/TM