



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

IDEMILSON DONIZETE MARIANO DO PRADO

**DETECÇÃO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL
NO *GREENSTONE BELT* DO RIO ITAPICURU, BA,
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE
IMAGENS GEOSCAN AMSS MK-II**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências,
como parte dos requisitos para obtenção do grau de
Mestre em Metalogênese.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta

Este trabalho foi aprovado pelo
redator e aprovado para a defesa
por Idemilson Donizete Mariano do Prado
e aprovado pelo orientador
em 29/05/97
Alvaro Penteado Crósta
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

JANEIRO - 1997

P882d

29932/BC



UNICAMP

UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

IDEMILSON DONIZETE MARIANO DO PRADO

**DETECÇÃO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL
NO GREENSTONE BELT RIO ITAPICURU, BA, ATRAVÉS
DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL
GEOSCAN AMSS MK-II**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências
como requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Metalogênese.

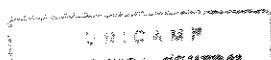
Orientador: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta - IG-UNICAMP

IG- P882d/97

CAMPINAS - SÃO PAULO

JANEIRO - 1997

97404513



UNIDADE	73C
N.º CHAMADA	TI/UNICAMP
	P882d
V.	E
T. C. F. S.	299.32
PREÇO	283/97
C	☐ ☐ ☒ ☐
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	30/09/97
N.º CPD	

PM.00098755-6

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

Prado, Idemilson Donizete Mariano do
P882d Detecção de zonas de alteração hidrotermal no greenstone belt do Rio Itapicuru, BA, através de técnicas de processamento de imagens Geoscan AMSS AMSS MK-II / Idemilson Donizete Mariano do Prado. Campinas, SP.: [s.n.], 1997.
Orientador: Alvaro Penteado Crósta
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
1. Sensoriamento Remoto. 2. Processamento de Imagens - Técnicas Digitais. 3. Espectrometria (Reflexão). I. Crósta, Alvaro Penteado. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

AUTOR: Idemilson Donizete Mariano do Prado

**DETECÇÃO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NO
GREENSTONE BELT DO RIO ITAPICURU, BA, ATRAVÉS DE
TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS
GEOSCAN AMSS MK-II.**

ORIENTADOR: Alvaro Penteado Crósta

Aprovada em: ____/____/____

COMISSÃO EXAMINADORA

PRESIDENTE: Prof.Dr. Alvaro Penteado Crósta - Orientador

EXAMINADORES: Prof. Dr. Roberto Perez Xavier

Prof. Dr. Teodoro Isneard Ribeiro de Almeida

Campinas, 29 de Janeiro de 1997.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e entidades que me apoiaram para a realização deste trabalho. Em especial:

Ao orientador Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta, pela viabilização do projeto e pela ajuda, incentivo, dedicação e amizade no decorrer do trabalho;

Ao Prof. Dr. Gilberto Amaral, pelo apoio e pelas sugestões mencionadas durante as etapas de trabalho;

A analista de sistema Patrícia Leite, pela disposição em auxiliar nos problemas de informática;

Aos colegas de mestrado e doutorado da Unicamp, Ronaldo Luis Mincato, Henrique Roig, Cristina Bicho, Edson Ribeiro, Wilson Oliveira, Gilberto Hernandes pelas discussões nas diversas etapas de trabalho;

A todos os funcionários do Instituto de Geociências, principalmente à Valdirene e Tânia;

Aos todos geólogos e técnicos da DOCEGEO/Salvador pelo apoio durante as etapas de campo;

À DOCEGEO-Geologia e Mineração pelo fornecimento dos dados Geoscan e geológicos, pelo suporte de campo e infra-estrutura;

À UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) pela realização de difratometria de raios-X;

Aos Desert Research Institute de Nevada pela realização de análises de espectrometria;

Ao LARID do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pela realização de análises de espectrometria, em especial ao Prof. Dr. Stephen;

Ao LAMIN (CPRM) pela realização de difratometria de raios-X;

A CPRM pela liberação e viabilidade da finalização do trabalho;

Ao PACDT/Finep pelo apoio ao LAPIG/UNICAMP;

A FAPESP pela bolsa de mestrado (Proc. 93/4018-6);

A minha família, em especial a minha irmã Leuci, pelo apoio e incentivo.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/DEPTO

ÁREA DE METALOGÊNESE

**DETECÇÃO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NO
GREENSTONE BELT DO RIO ITAPICURU, BA, ATRAVÉS DE TÉCNICAS
DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS GEOSCAN AMSS MK-II**

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Idemilson Donizete Mariano do Prado

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos com aplicação de técnicas de processamento digital de imagens Geoscan AMSS MK-II na região do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta, localizado na porção nordeste do estado da Bahia. O objetivo geral foi avaliar o desempenho das técnicas de processamento digital de imagens na discriminação das zonas de alteração hidrotermal associadas à mineralização aurífera. A aplicação de técnicas de processamento digital nas imagens Geoscan AMSS MK-II permitiram a discriminação das principais unidades litológicas, definidas no mapeamento realizado pela DOCEGEO, além de identificar ocorrências superficiais de minerais relacionados a processos de alteração hidrotermal. Porém, nesta região onde há atuação de intemperismo químico, uma avaliação mais criteriosa quanto à geologia e a origem do mineral discriminado é necessária. A origem deste mineral pode ter sido hidrotermal ou intempérica. Os resultados das análises de espectrometria de reflexão e difratometria de raios-X das amostras coletadas na área permitiram caracterizar que os solos oriundos das zonas mineralizadas e das encaixantes possuem composição mineralógica e comportamento espectral muito similares.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/DEPTO

ÁREA DE METALOGÊNESE

**DETECÇÃO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL NO
GREENSTONE BELT DO RIO ITAPICURU, BA, ATRAVÉS DE TÉCNICAS
DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS GEOSCAN AMSS MK-II**

ABSTRACT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Idemilson Donizete Mariano do Prado

This work presents the results of digital image processing techniques applied to Geoscan AMSS MK-II in the region of the Fazenda Maria Preta Gold Deposit, in the northeast of Bahia State. The main objective was to evaluate the performance of these techniques for characterization of hydrothermal alteration zones associated with gold mineralization. The application of selected techniques to Geoscan AMSS MK-II allowed discrimination of the main lithologic unities, as defined by DOCEGEO, and also the main superficial occurrences of minerals related to hydrothermal alteration. Otherwise, in this region where there are chemistry intemperism, it's necessary a more accurate evaluation of the geology and the mineral source descriminated. The origin of this mineral should have been hydrothermal or weathering. Spectrometry and X-ray diffraction studies in samples collected in the study area allowed of equal patterns for the mineralization and host rocks.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE FOTOS.....	vii
LISTAS DE TABELAS.....	viii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais.....	01
1.2 - Objetivos.....	02
1.3 - Metodologia.....	03
1.4 - Materiais Utilizados.....	04
1.4.1 - Características do Sensor Geoscan e da Aquisição dos dados.....	04
1.4.2 - Outros Materiais.....	07
1.5 - Justificativa.....	08
1.6 - Localização e Fisiografia da Área.....	08
1.7 - Vegetação.....	10

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 - Geologia Regional.....	13
2.2 - Geologia do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru.....	15
2.2.1 - Litoestratigrafia.....	15
2.2.2 - Metamorfismo.....	18
2.2.3 - Geologia Estrutural.....	19
2.2.4 - Geocronologia.....	22
2.2.5 - Evolução Geotectônica.....	23

2.3 - Geologia Local.....	24
2.4 - Mineralização e Alteração Hidrotermal.....	27

CAPÍTULO 3- ANÁLISES DOS DADOS DE ESPECTROMETRIA DE REFLEXÃO

3.1 - Introdução.....	31
3.2 - Características Espectrais de Minerais de.....	32
3.3 - Metodologia.....	35
3.4 - Análise das Curvas Espectrais.....	42
3.5 - Discussão.....	51

CAPÍTULO 4 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

4.1 - Introdução.....	54
4.2 - Pré-Processamento.....	55
4.2.1 - Correção Geométrica.....	55
4.2.2 - Correção Atmosférica.....	57
4.2.3- Ruídos.....	59
4.3 - Técnicas de Processamento Digital de Imagens.....	59
4.3.1 - Aumento de Contraste.....	60
4.3.2 - Composição Colorida.....	64
4.3.3 - Operações Aritméticas.....	70
4.3.4 - Principais Componentes.....	75
4.3.4.1 - Aplicação da Técnica "FPCS".....	77
4.4 - Discussão.....	86

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Efeitos das distorções não-sistemáticas em imagens aeroportadas.....	07
Figura 1.2 - Mapa de localização e vias de acesso.....	09
Figura 2.1 - Ambiente tectônico do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru.....	14
Figura 2.2 - Mapa geológico do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru.....	16
Figura 2.3 - Relação entre as intrusões graníticas e os eventos deformacionais D_1 e D_2 ...	21
Figura 2.4 - Síntese geocronológica do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru.....	23
Figura 2.5 - Mapa geológico do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru com a localização da área.....	25
Figura 2.6 - Mapa geológico da área do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta.....	26
Figura 2.7 - Mapa geológico esquemático dos corpos de minério da Faixa Antas-Maria Preta.....	28
Figura 3.1 - Feições de absorção devido à transição eletrônica no espectro dos óxidos e hidróxidos de ferro, comumente associados as alterações hidrotermais.....	33
Figura 3.2 - Feições de absorção devido aos processos vibracionais das hidroxilas nos argilominerais.....	34
Figura 3.3 - Localização dos alvos de coleta de solos e rochas.....	37
Figura 3.4 - Curvas espectrais das amostras de solo do alvo Antas III/Corpo 1.....	44
Figura 3.5 - Curvas espectrais das amostras de solo do alvo Antas III/Corpo 3.....	45
Figura 3.6 - Curvas espectrais das amostras de solo e rocha do alvo Antas III/Corpo 1....	45
Figura 3.7 - Curvas espectrais das amostras de solo do alvo Antas II/Corpo 1.....	46
Figura 3.8 - Curva espectral da amostra de solo AT-04 do alvo Antas II/Corpo 1.....	46
Figura 3.9 - Curvas espectrais das amostras de solo do alvo Lajinha Norte.....	47
Figura 3.10 - Curvas espectrais das amostras de solo e rocha do alvo Lajinha Norte.....	47
Figura 3.11 - Curvas espectrais das amostras de solo do alvo Saco III.....	48
Figura 3.12 - Curvas espectrais das amostras de solo e rocha do alvo Saco III.....	48
Figura 3.13 - Curvas espectrais das amostras de solo do alvo Lajinha Sul.....	49
Figura 3.14 - Curvas espectrais das amostras de solo e rocha do Alvo I.....	49
Figura 4.1 - Mostra o mapa geológico do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru com a localização da imagem Geoscan AMSS MK-II na área de estudo.....	58

Figura 4.2 - Curvas espectrais de algumas rochas e minerais em relação às posições das bandas do Geoscan AMSS MK-II.....	61
Figura 4.3 - Mostra as posições centrais das 6 bandas do Landsat/TM e as 18 bandas do Geoscan AMSS MK-II no VNIR e SWIR, superimpostas no espectro da caolinita.....	62
Figura 4.4 - Curvas BCET obtidas para as imagens Landsat/TM da região de Fortaleza de Minas.....	63
Figura 4.5 - Composição colorida em RGB (4 2 1).....	66
Figura 4.6 - Composição colorida em RGB (17 8 2).....	67
Figura 4.7 - Composição colorida em RGB (20 14 6).....	68
Figura 4.8 - Composição colorida em RGB (20 21 22).....	69
Figura 4.9 - Composição colorida em RGB (2-1 3-2 6-8).....	73
Figura 4.10 - Composição colorida em RGB (6/7 6/8 6/9).....	74
Figura 4.11 - Composição colorida em RGB (12/16 12/14 15/17).....	76
Figura 4.12 - PC 4 contendo a informação relacionada à goetita.....	81
Figura 4.13 - PC 4 contendo a informação relacionada à sericita.....	82
Figura 4.14 - Composição colorida em RGB das imagens PCs sericita, goetita e quartzo..	83
Figura 4.15 - Composição colorida em RGB das imagens PCs goetita, goetita+sericita e sericita.....	84
Figura 4.16 - Composição colorida em RGB das imagens PCs goetita, goetita+sericita e sericita com a localização das anomalias detectadas e das minas.....	85

LISTA DE FOTOS

Foto 1.1 - Vista panorâmica do relevo da área.....	10
Foto 1.2 - Vista panorâmica da plantação de cissal.....	11
Foto 1.3 - Vista da vegetação natural da região (caatinga).....	11
Foto 1.4 - Vista panorâmica da plantação de gramíneas (pastagens).....	12
Foto 2.1 - Padrão geral dos litotipos deformados e hidrotermalizados da área.....	27
Foto 4.1 - Vista da ocorrência de quartzo no solo residual.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Especificações das bandas do Geoscan AMSS MK-II.....	05
Tabela 2.1 - Associações metamórficas das rochas máficas do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru e suas estimadas condições de P-T.....	19
Tabela 2.2- Evolução tectônica dos domínios central e meridional do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru, segundo Sá (1982) e Teixeira (1984).....	20
Tabela 2.3 - Evolução tectônica do <i>greenstone belt</i> do Rio Itapicuru, segundo Silva & Matos (1991).....	20
Tabela 3.1 - Composição mineralógica das amostras do alvo Antas III.....	38
Tabela 3.2 - Composição mineralógica das amostras do alvo Antas II.....	38
Tabela 3.3 - Composição mineralógica das amostras do alvo Lajinha Norte.....	39
Tabela 3.4 - Composição mineralógica das amostras do alvo Saco III.....	39
Tabela 3.5 - Relação das amostras com o laboratório que foi realizado a análise de espectrometria.....	39
Tabela 3.6 - Características das amostras analisadas do Alvo Antas III.....	40
Tabela 3.7 - Características das amostras analisadas do Alvo Antas II.....	40
Tabela 3.8 - Características das amostras analisadas do Alvo Lajinha Norte.....	41
Tabela 3.9 - Características das amostras analisadas do Alvo Saco III.....	41
Tabela 3.10 - Características das amostras analisadas do Alvo Lajinha Sul.....	41
Tabela 3.11 - Características das amostras analisadas do Alvo I.....	41
Tabela 4.1 - Síntese das fontes mais comuns geradoras das imperfeições internas e externas nos imageamentos por sensores aeroportados.....	56
Tabela 4.2 - Sub-conjuntos de bandas selecionadas para Principais Componentes.....	77
Tabela 4.3 - Auto-vetores obtidos por Principais Componentes para quatro bandas do Geoscan AMSS MK-II.....	80

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

A utilização de produtos de sensoriamento remoto na caracterização de zona de alteração hidrotermal associadas à mineralizações vem se tornando um assunto de numerosos estudos, especialmente no caso de depósitos auríferos do tipo *lode* em terrenos granito-*greenstones* (Ashley & Abrams, 1980; Podwysocki *et al.*, 1983; Elvidge & Lyon, 1984; Fraser *et al.*, 1986; Huckerby *et al.*, 1986; Magee *et al.*, 1986; Kaufmann, 1988; Lamb & Pendock, 1989; Moore & Guo, 1990; Loughlin, 1991; Crósta & Rabêlo, 1992, 1993; Ferreira Jr. *et al.*, 1992,; Meneses *et al.*, 1993; Agar, 1994; Hernandes, 1994). Os principais tipos de alteração hidrotermal associada a esses depósitos são: propilitização, sericitização, argilização, carbonatação, cloritização, silicificação e sulfetação.

Porém, na prática, a possibilidade de se mapear minerais de interesse à exploração mineral através de imagens de sensoriamento remoto sofre algumas limitações. Uma delas diz respeito à própria disponibilidade de dados. Dos sensores orbitais atualmente em operação, somente os sensores Landsat/TM e JERS/OPS cobrem o intervalo do espectro eletromagnético em que minerais de alteração possuem feições diagnósticas; o Landsat/TM com apenas uma banda e JERS/OPS com três bandas. No caso Landsat/TM, a banda TM7, por ser única e larga, não permite a diferenciação entre minerais de alteração hidrotermal. Por outro lado, a importância de estudos sobre a utilização do sensoriamento remoto em exploração mineral deve-se ao fato de já existirem em operação sensores aeroportados com resolução espectral adequada para tal fim, além de projetos de futuros sensores orbitais com alta resolução espectral (Taranik & Crósta, 1996).

Para a pesquisa proposta neste projeto, além das tradicionais técnicas já existentes (subtração e razão de bandas), novas técnicas de tratamento de imagens vêm sendo desenvolvidas, tais como a *Feature-Oriented Principal Components Selection* - FPCS (Crósta

& Moore, 1989; Loughlin, 1991) e a *log residuals* (Fraser *et al.*, 1986). Para fazer uso dessas técnicas, é de suma importância o conhecimento do comportamento espectral dos materiais constituintes da superfície terrestre, para a discriminação e qualificação da informação contida em uma imagem. Neste sentido, há uma constante preocupação em se caracterizar o comportamento espectral dos diferentes materiais, determinando-se as feições de absorção e reflectância que descrevem a assinatura espectral típica para cada material (Hunt & Salisbury, 1970; Hunt & Ashley, 1979; Crowley, 1984; Krohn, 1986; Goetz, 1982; Goetz *et al.*, 1991; Grove *et al.*, 1992; Clark *et al.*, 1993). Para o caso específico de obtenção de medidas espectrais de minerais e rochas, grande atenção tem sido dada aos produtos de alteração hidrotermal relacionados à mineralizações, os quais apresentam feições espectrais típicas (Hunt & Salisbury, 1970; Hunt & Ashley, 1979; Crowley, 1984; Krohn, 1986; Goetz, 1982; Grove *et al.*, 1992; Goetz *et al.*, 1991; Clark *et al.*, 1993).

O depósito aurífero da Fazenda Maria Preta foi o estudo de caso escolhido para estudar esse tipo de alteração usando sensoriamento remoto, pois apresenta as seguintes características favoráveis: localização em uma região semi-árida, exposições superficiais tanto das rochas hospedeiras quanto das zonas de alteração hidrotermal, disponibilidade de mapeamento geológico em escala adequada, cobertura vegetal pouco densa e disponibilidade de dados de sensoriamento remoto multiespectrais, com resolução espacial e espectral adequada ao estudo proposto. Esse estudo utilizou os dados do sensor aeroportado multiespectral Geoscan Airbone Multiespectral Scanning Systems (AMSS) MK-II.

1.2 - Objetivos

O projeto tem como objetivo principal avaliar o potencial das técnicas de processamento digital de imagens no realce das informações espectrais dos minerais de alteração hidrotermal associados aos depósitos auríferos da Fazenda Maria Preta, utilizando-se imagens multiespectrais Geoscan AMSS MK-II. Um segundo objetivo consistiu na caracterização espectral e mineralógica dos materiais superficiais (solos e rochas) associados às zonas de alteração hidrotermal, procurando correlacioná-la com as feições espectrais observadas nas imagens.

Visando alcançar os objetivos propostos, foram executado os seguintes procedimentos:

- 1 - avaliação do desempenho das técnicas de processamento digital de imagens na identificação litológica e estrutural da área em estudo;
- 2 - estabelecer uma metodologia para discriminação dos minerais associados a alteração hidrotermal na região do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta através de técnicas de processamento digital de imagens;
- 3 - avaliação das vantagens e desvantagens das diferentes técnicas aplicadas na discriminação mineral;
- 4 - avaliação da aplicabilidade dos estudos de espectrometria de reflexão na área em estudo, procurando correlacionar a resposta espectral de amostras de solo e rocha das áreas com alteração hidrotermal com as feições espectrais observadas nas imagens.

1.3 - Metodologia

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho, foi executada em etapas progressivas, envolveram revisão bibliográfica, treinamento em *softwares*, pré-processamento e processamentos das imagens, trabalhos de campo, preparação de amostras, análises de laboratórios e confecção da dissertação.

Primeiramente realizou-se um levantamento bibliográfico referente ao tema proposto e da área a ser pesquisada. Essa revisão teve como intuito o embasamento teórico do sensoriamento remoto na exploração mineral.

A seguir executou-se o processamento das imagens Geoscan AMSS MK-II para realce de litologias, feições estruturais e identificação de áreas com concentração anômala em minerais oriundos de alterações hidrotermais. Esse processamento foi realizado após o estudo teórico do sensoriamento remoto, do comportamento espectral dos principais minerais superficiais e do

treinamento no *software* utilizado para este processamento. Num primeiro estágio, foram utilizadas técnicas convencionais de processamento de imagens, tais como, aumento de contraste, composição colorida, filtragem para realce de estruturas e operações aritméticas. Posteriormente, experimentou-se técnicas mais avançadas, tais como, variâncias na aplicação de principais componentes. Ambas as etapas de testes objetivaram realçar as litologias e estruturas geológicas e de discriminar os minerais de alteração hidrotermal.

Finalmente, com os resultados obtidos com o processamento dos dados Geoscan AMSS MK-II, foi realizado uma etapa de campo para o reconhecimento geológico da área e checagem das anomalias espectrais, verificadas nas imagens. As informações contidas nas imagens foram comparadas com as informações do mapa geológico da área. Também, durante esta etapa de campo coletou-se amostras de solo e rocha para análise de espectrometria de reflexão e difratometria de raios-X. Essas análises foram realizadas com a finalidade de caracterizar a composição mineralógica e o comportamento espectral dos diferentes solos residuais e rochas da região. A partir da combinação da composição mineralógica, do comportamento espectral dos solos e rochas da área com os produtos do processamento digital de imagens, foi possível discriminar áreas com mineralogia favorável à concentração de ouro.

1.4 - Materiais

1.4.1 - Características do Sensor Geoscan e da Aquisição dos Dados

As imagens utilizadas nesse projeto foram adquiridas em um levantamento aeroportado contratado em setembro de 1992 pela DOCEGEO - Rio Doce Geologia e Mineração, na região do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta. Esses dados foram obtidos pelo sensor Geoscan AMSS MK-II, voando à uma altitude média 2386 metros e resolução espacial de 5 metros.

O sensor Geoscan AMSS MK-II foi descrito em vários trabalhos (Honey & Daniels, 1986; Gunn *et al.*, 1989; Lyon & Honey, 1990; Derriman & Agar, 1990; Huntington *et al.*, 1991; Agar, 1992, 1994). O AMSS MK-II foi desenvolvido como uma ferramenta para a exploração mineral pela Geoscan Pty. Ltd., da Austrália e consiste de um *scanner* aeroportado alojado em

uma aeronave modelo Cessna 404. Esse sistema de aquisição de dados possui 46 bandas, das quais 24 podem ser selecionadas simultaneamente para captação dos dados. Essas 24 bandas estão divididas ao longo do espectro eletromagnético da seguinte forma: 10 bandas no visível/infravermelho próximo (VNIR), 8 no infravermelho ondas-curtas (SWIR) e 6 no infravermelho Termal (TIR). A resolução espacial é variável (3 a 20 metros), dependendo da altura do voo. O recobrimento é feito em faixas de 3 a 20 km de largura. O campo de visada (FOV) é ± 45 graus da nadir com um campo de visada instantâneo (IFOV) de 2.1 a 3.0 miliradianos. A Tabela 1.1 apresenta o comprimento de ondas central e largura de cada uma das 24 bandas.

Banda		Comprimento de Onda Central (μm)	Largura da Banda (μm)	Banda		Comprimento de Onda Central (μm)	Largura da Banda (μm)
1	V N I R	522	42	13	S W I R	2136	44
2		583	67	14		2176	44
3		645	71	15		2220	44
4		693	24	16		2264	44
5		717	24	17		2308	44
6		740	23	18		2352	44
7		830	22	19	T I R	8640	530
8		873	22	20		9170	530
9		915	21	21		9700	530
10		955	20	22		10220	533
11		2044	44	23		10750	533
12		2088	44	24		11280	533

Tabela 1.1 - Especificações das bandas do Geoscan AMSS MK-II

As imagens digitais geradas pelo sensor Geoscan AMSS MK-II estão sujeitas a uma série de distorções, como em geral ocorre com qualquer imageador óptico acoplado a uma plataforma aeroportada. As principais distorções são: *tan theta*, tamanho do *pixel*, curva sigmóide. A estas somam distorções causadas pelo movimento do avião (*roll*, *pitch*, *yaw*), pelo vento e por variações na elevação do terreno. Algumas dessas distorções são corrigidas logo após a realização do levantamento (*tan theta*, tamanho do *pixel*, curva sigmóide), enquanto outras

(*roll*, *pitch*, *yaw*, vento e variação na elevação) são eliminadas posteriormente, na fase de pré-processamento, através da correção geométrica (Geoscan, 1992; Hernandez, 1994).

A distorção *tan theta* é gerada à medida que o sistema de varredura se distancia do ponto *nadir*. A imagem gerada deve ser reamostrada para que passe a ter *pixel* de tamanho constante. No caso do Geoscan AMSS MK-II, a imagem original possui 768 *pixels* de largura (na direção perpendicular à linha de vôo) e após a correção *tan theta* a imagem passa a ter 990 *pixels*.

Outro problema de distorção no tamanho do *pixel* é causado pelos detectores, que capturam dados para áreas no terreno que não possuem forma quadrada mas sim retangular. Resultando o *overlap* entre *pixels* e na falta de ajustamento entre as faixas imageadas. Em consequência, os *pixels* dobram de tamanho no final da linha imageada, gerando uma imagem desfocada nas bordas. A correção consiste na aplicação de algoritmos de deconvolução para focar a imagem.

A distorção curva sigmóide é devido ao sistema de imageamento. O espelho giratório do sensor varre o terreno da esquerda para direita, com uma velocidade variável segundo uma curva sigmóide. Isso deve ser corrigido para que as imagens apresentem *pixels* quadrados.

As distorções causadas pelo movimento do avião (*roll*, *pitch* e *yaw*) são devidas à instabilidade da aeronave segundo os três eixos de rotação. Essas distorções e as imagens resultantes são ilustradas na Figura 1.1.

As distorções causadas pelo vento são geradas pelo fato de que aeronave deve voar em uma direção com pequeno ângulo em relação à direção pretendida, para compensar os efeitos do vento. Quando este ângulo é diferente de zero ocorrem distorções. A realização da correção consiste em determinar o ângulo exato entre a direção do vento e a direção pretendida.

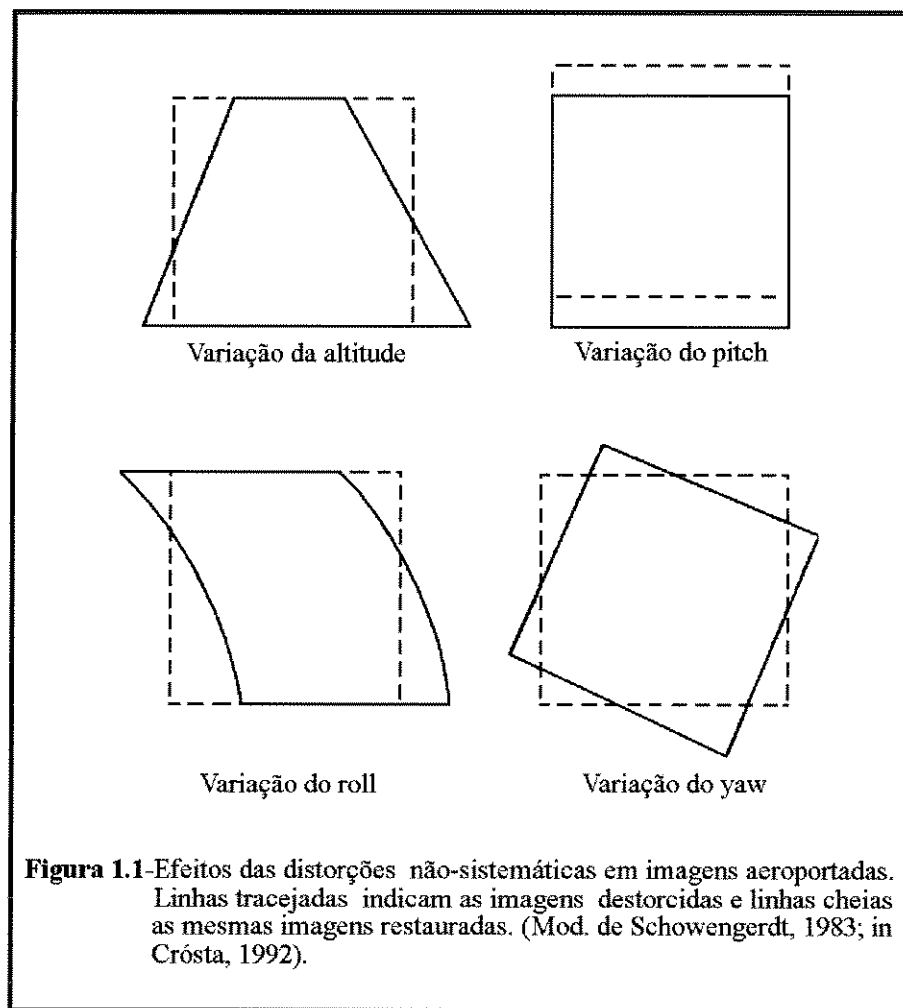
Existem ainda distorções causadas pelas variações na elevação do terreno. Na área de estudo as diferenças topográficas variam de 200 a 1000 metros, o que faz com que as imagens não tenham uma resolução espacial constante. No caso do Geoscan AMSS MK-II a solução

adotada consistiu em acoplar à aeronave um radar altímetro, que permite que as oscilações na superfície do terreno sejam registradas e posteriormente corrigidas.

1.4.2 - Outros Materiais

- Mapas Geológicos

- Mapa regional do *greenstone belt* do Rio Itapicuru, na escala 1:100000 (Docegeo);
- Folha Ambrósio, na escala 1:50000 (Docegeo);
- Folha Lajinha, na escala 1:50000 (Docegeo).



1.5 - Justificativa

Apesar de já conhecidas para terrenos áridos e semi-áridos de outros países, o potencial operacional da aplicação de sensoriamento remoto à exploração mineral de zonas auríferas em terrenos brasileiros ainda não é suficientemente conhecido. Muitos fatores influenciam esta operacionalidade, tais como as condições fisiográficas e climáticas, tipos e densidade da cobertura vegetal, grau de exposição das rochas, mineralogia original e pós-intemperismo, etc. Daí a necessidade de que esta variedade de situações seja analisada, e se defina a aplicabilidade do sensoriamento remoto multiespectral, aeroportado ou orbital, às atividades de exploração mineral, no Brasil.

O entendimento dos processos intempéricos é importante também, pois corrobora a pesquisa sobre dados que são atualmente escassos mas, que num futuro próximo, serão popularizados com o lançamento de sensores orbitais hiperespectrais.

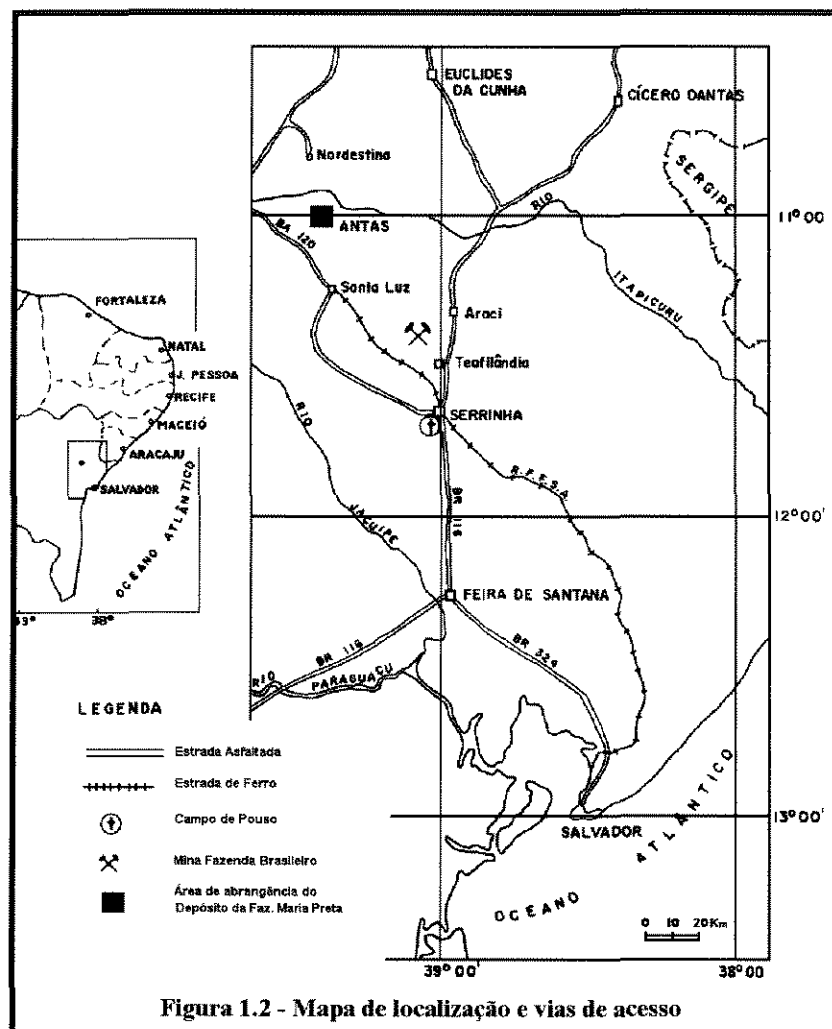
A disponibilidade de dados de alta resolução espectral no país é escassa, constituindo os dados Geoscan AMSS MK-II para área de estudo uma exceção, que permite uma oportunidade de avaliação do desempenho desse tipo de instrumento em condições de intemperismo.

1.6 - Localização e Fisiografia da Área

O *greenstone belt* do Rio Itapicuru localiza-se no nordeste do Estado da Bahia, a cerca de 300 km de Salvador, entre os paralelos 10°15' e 11°30'sul e meridianos 38°15' e 39°30' oeste, compreendendo uma área de aproximadamente 4000 km². As principais cidades da região são Serrinha, ao sul e Santa Luz ao norte.

A área estudada localiza-se a 32 km a norte da cidade de Santa Luz, na porção centro-norte do *greenstone belt* do Rio Itapicuru. Está delimitada entre os paralelos 10°58'55" e 11°06'31" sul e meridianos 39°15'56" e 39°18'40" oeste, correspondentes às UTM 8.772.000 a 8.785.000 S e 466.000 a 471.000 W, totalizando uma superfície aproximada de 65 km².

O acesso à área, partindo de Salvador, é feito pela BR-324 até a cidade de Feira de Santana e, pela BR-116 até a cidade de Serrinha. A partir daí, toma-se a rodovia pavimentada BA-409 até a cidade de Santa Luz. De Santa Luz até a área em estudo, o acesso se dá através de uma estrada vicinal (Figura 1.2).



De forma geral, o relevo apresenta-se plano-ondulado no terreno granito-*greenstone*, enquanto que no embasamento destaca-se a ocorrência de serras estreitas, alinhadas na direção norte-sul (Foto 1.1).

O tipo de clima característico da região é o semi-árido quente, com índices pluviométricos não superiores a 800 mm anuais, concentrados durante o verão.

O Rio Itapicuru, juntamente com seus afluentes Rio do Peixe e Cariaça, possuem padrões dendríticos de baixa densidade, constituindo a rede hidrográfica da bacia.

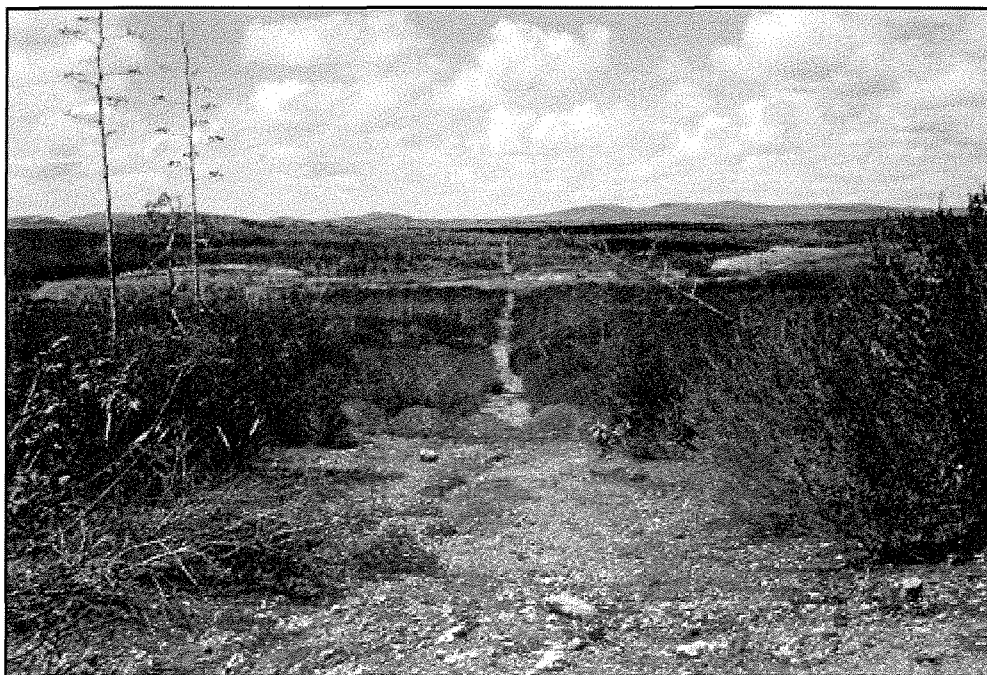


Foto 1.1 - Vista panorâmica do relevo da área. Em primeiro plano estão os terrenos "granito-greenstone" e ao fundo observa-se as serras do embasamento.

1.7 - Vegetação

A vegetação natural da região é a caatinga arbustiva aberta. Porém, a região mostra uma alta taxa de degradação das espécies naturais, as quais foram substituídas por gramíneas, para pastagens e/ou por áreas de agricultura.

As atividades de agricultura na área estudada é constituída principalmente pela monocultura de cisal, utilizada na produção de celulose e fibras naturais. Trata-se de uma planta de estatura baixa, com folha grandes, largas e espessas (Foto 1.2) que em permanece verde o ano todo. A porção oeste e sul são constituída por caatinga (Foto 1.3), com árvores de porte baixo e esparsas; pastagens ocorrem na porção sul (Foto 1.4).

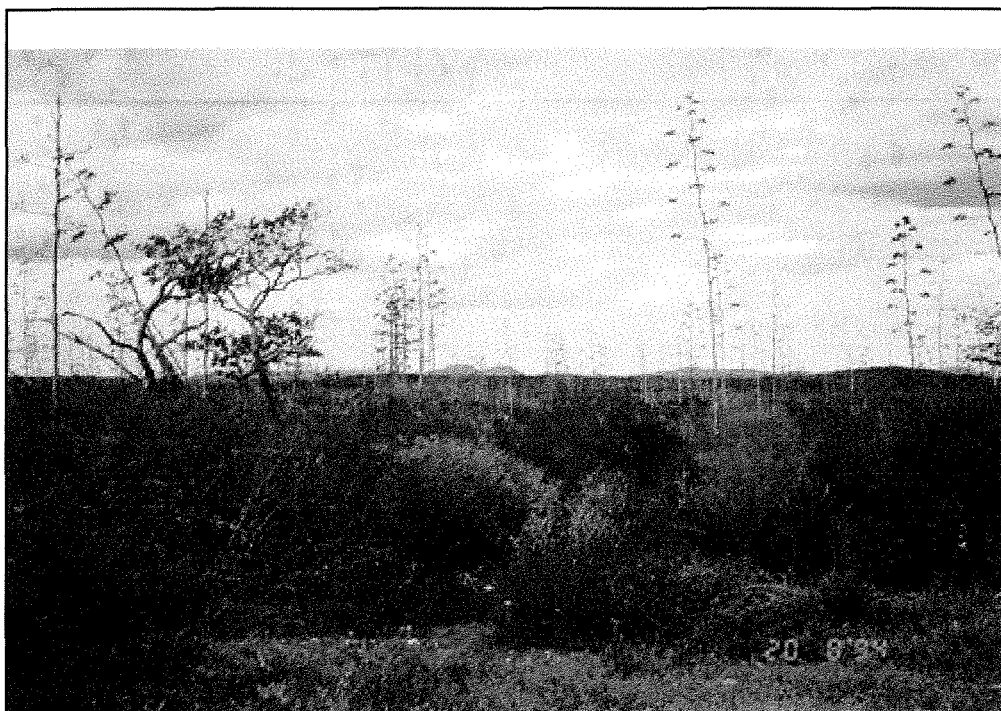


Foto 1.2 - Vista panorâmica da plantação de cissal.



Foto 1.3 - Vista da vegetação natural da região (caatinga).



Foto 1.4 - Vista panorâmica de plantação de gramíneas (pastagens).

CAPÍTULO 2

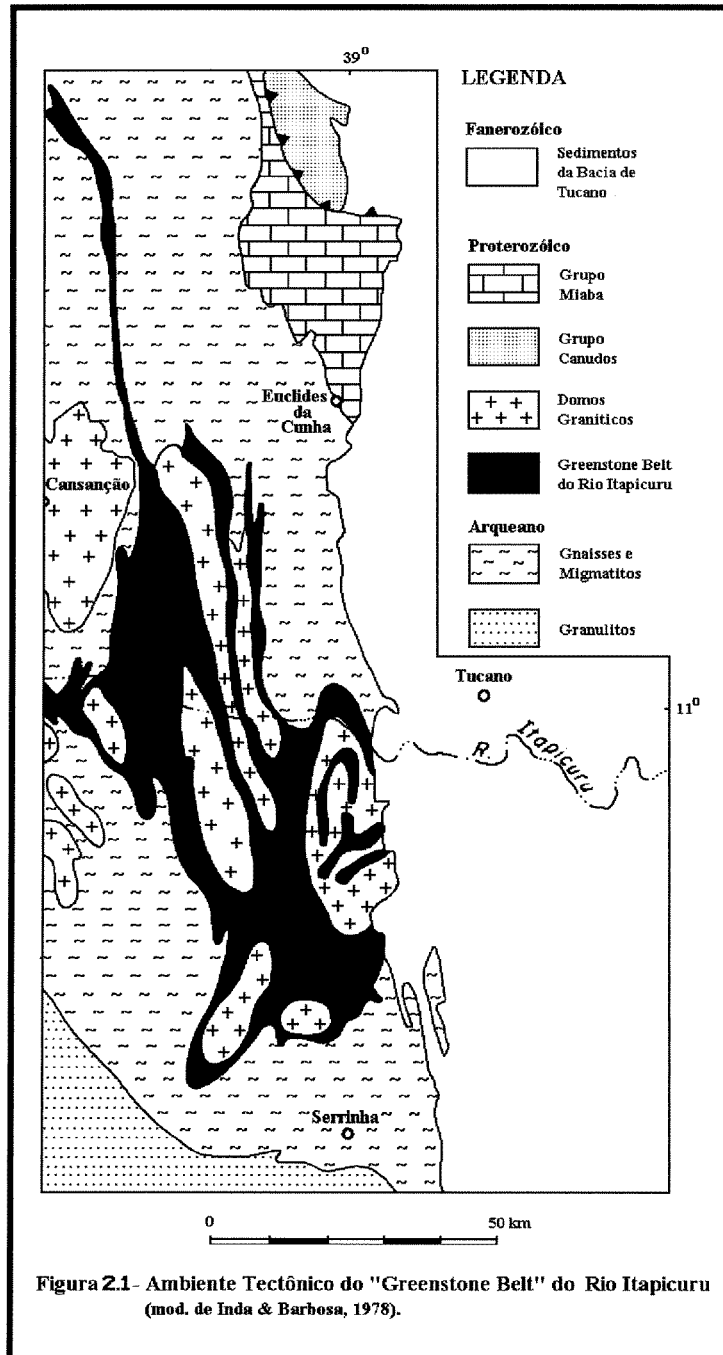
2 - CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 - Geologia Regional

O *greenstone belt* do Rio Itapicuru compreende uma sequência de rochas vulcano-sedimentares, situada em um dos blocos estáveis que compõem o Cráton do São Francisco. Esse bloco, denominado por Seixas *et al.* (1975, *apud* Rocha Neto, 1994) de Cráton de Serrinha, está localizado entre a Bacia de Tucano e o Cinturão Móvel Salvador-Curaçá. A Bacia de Tucano é um *graben* preenchido por sedimentos de idade cretácea, enquanto que o Cinturão Móvel Salvador-Curaçá consiste em rochas arqueanas da fácies granulito (Figura 2.1).

O Cráton Serrinha, embasamento do *greenstone belt* do Rio Itapicuru, compreende os migmatitos e gnaisses pertencentes aos grupos Pedra Vermelha e Uauá Superior de Inda *et al.* (1976, *apud* Rocha Neto, 1994) e do Complexo Pedra Vermelha de Lima *et al.* (1981, *apud* Rocha Neto, 1994), resultantes da subdivisão do Complexo Metamórfico-Migmatítico de Mascarenhas (1976). Também fazem parte desse embasamento as rochas componentes do Grupo Uauá Inferior de Inda *et al.* (op. cit.) e as formações Medrado, São Gonçalo e Monte Santo de Lima *et al.* (op. cit.). Todas essas rochas estão metamorfisadas na fácies anfibólito.

Sequências de cobertura a partir do Proterozóico Superior depositam-se sobre o *greenstone belt* do Rio Itapicuru e seu embasamento. Essas coberturas compreendem os grupos Canudos e Miaba e os sedimentos que preenchem a Bacia de Tucano. O Grupo Canudos, do Proterozóico Superior, aflora no canto noroeste da área da Figura 2.1. A sua litologia consiste de metargilitos com intercalações de metacalcários, metaconglomerados e dolomitos. O Grupo Miaba, também do Proterozóico Superior e pertencente à Faixa Sergipana, aflora a norte de Euclides da Cunha e seu limite setentrional é uma falha contraccional que o separa do grupo Canudos.



As rochas sedimentares mesozóicas da Bacia de Tucano afloram ao longo do limite oriental da área. O seu contato com o *greenstone belt* do Rio Itapicuru e com o embasamento é em parte discordante e em parte por falhamentos. Essas rochas são constituídas de arenitos, siltitos, folhelhos, argilitos e calcários, pertencem às formações Aliança, Sergi, Candeias e São Sebastião.

2.2 - Geologia do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru

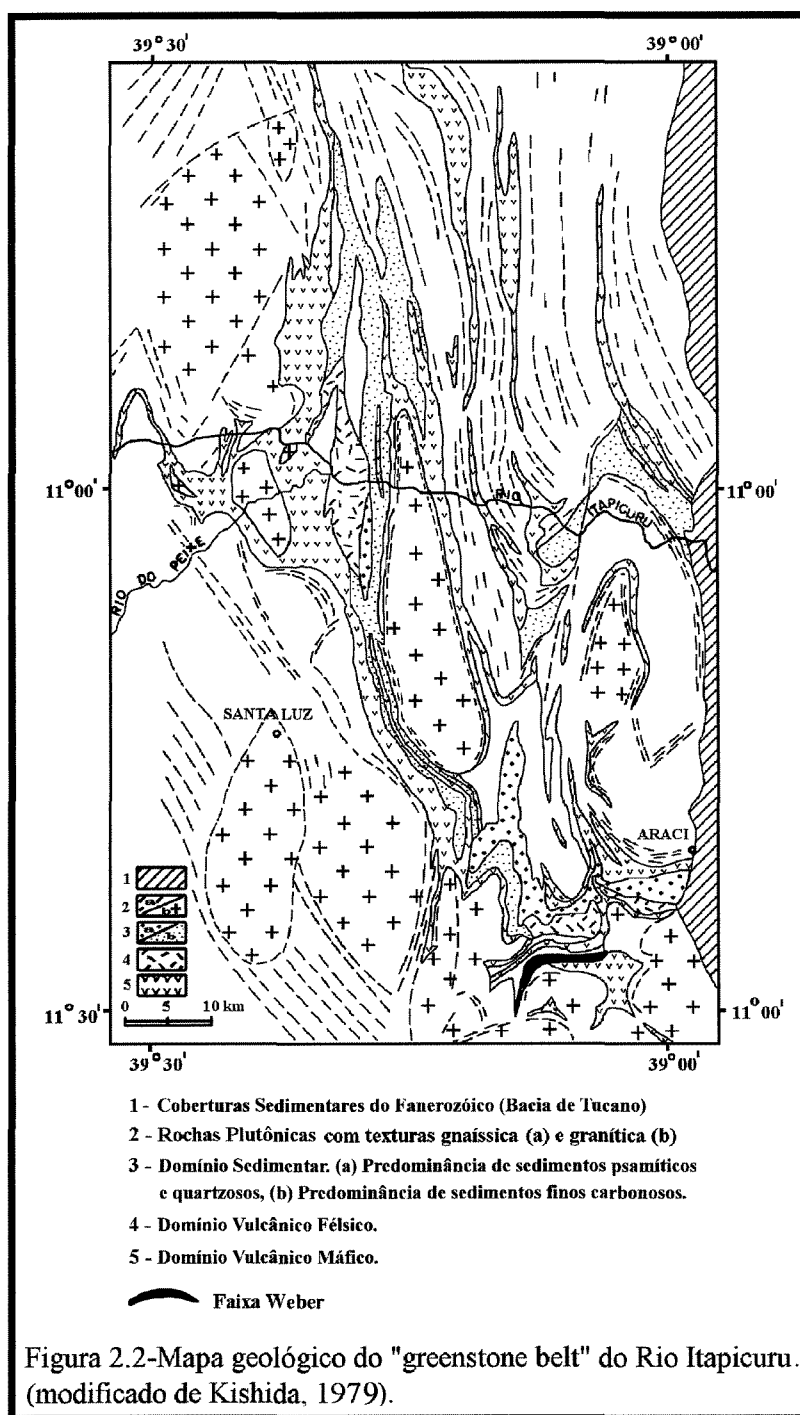
O *greenstone belt* do Rio Itapicuru compreende uma sequência de rochas vulcano-sedimentares metamorfasadas predominantemente no fácies xisto-verde, estendendo-se por mais de 100 km na direção NS. As melhores exposições desta sequência supracrustal estão ao longo do Rio Itapicuru, onde Kishida (1979) e Silva (1983, 1987) desenvolveram os trabalhos para a caracterização do *greenstone belt*.

2.2.1 - Litoestratigrafia

De acordo com trabalhos realizados na região (Kishida, op. cit.; Silva, op.cit.; Davison, 1988), as rochas vulcano-sedimentares do *greenstone belt* do Rio Itapicuru foram agrupadas em três domínios litológicos, embora não necessariamente homogêneos: (1) Domínio Vulcânico Máfico (DVM); (2) Domínio Vulcânico Félsico (DVF) e; (3) Domínio Sedimentar (DS). Além desses três domínios, estão presentes rochas intrusivas (Figura 2.2).

O DVM ocorre principalmente nas zonas marginais dos outros domínios, em contato com os granitóides e gnaisses. Este domínio é constituído de metabasaltos maciços, localmente com estruturas variolíticas, *pillow* lavas, brechas, etc. Entre os derrames, ocorrem intercalações de sedimentos químicos e clásticos finamente laminados, cherts, BIFs, xistos (localmente carbonosos) e pequenos corpos de sulfeto maciço.

Segundo Kishida (1979) essas litologias mostram afinidade toleítica, similar aos toleítos de fundo oceânicos modernos. A associação litológica, junto com as estruturas de *pillow* lavas existentes, sugerem um ambiente de bacia imersa, com pouco fluxo de sedimentos clásticos, mas com alta efusão de basaltos subaquosos em condições de águas tranquilas e profundidade média. Condições tanto oxidantes como redutoras são evidenciadas pelas intercalações de formação ferrífera de fácies óxido e argilas carbonosas com sulfetos maciços.



O DVF sobrepõe-se à sequência vulcânica máfica e é mais restrito em área. É caracterizado por centros vulcânicos em formas de lentes, formados por fluxos finos descontínuos de lavas andesítica-dacíticas, intercaladas com rochas piroclásticas (tufo finos, lapili e aglomerados), epiclásticas (arenitos, siltitos e pelitos), e subordinadamente sedimentos químicos. Estas características indicam que o DVF foi formado principalmente como resultado de erupções

subaéreas, com intervalos de retrabalhamento e deposição em ambientes subaquosos (Davison *et al.*, 1988). Geoquimicamente, as litologias do DVF são comparadas com rochas calco-alcálicas de margem continental (Kishida, 1979).

O DS é formado por entidades individualmente espessas na parte superior da sequência vulcano-sedimentar, podendo ser também encontrado intercalado aos DVM e DVF. Os principais tipos de rochas neste domínio são os psamitos de granulação fina e pelitos ritmicamente bandados, com estratificações plano-paralelas; subordinadamente ocorrem arcósios e conglomerados. A presença de cherts laminados, jaspelitos, BIFs e sedimentos ricos em manganês (gonditos com espessartita e quartzo) são marcas de períodos com baixo fluxo de sedimentação clástica. Esta sequência é interpretada como turbiditos distais de derivação vulcânica, com intercalação de sedimentos químicos. As raras ardósias e conglomerados ocorrem próximo à base da sequência, indicando condições mais proximais.

As suítes de rochas intrusivas circundadas pelas supracrustais são as seguintes:

- Os domos granito-gnáissicos ocorrem em forma elíptica, com diâmetro variando de alguns quilômetros até mais de 50 km. Os domos variam desde tonalito a granodiorito, apresentando deformados nas margens e representados por gnaisses graníticos e migmatitos, geralmente cortados por pegmatitos ricos em turmalina (Matos & Davison, 1987).
- Granitóides maciços, de granulometria média a grossa, com dimensões desde alguns quilômetros até 50 km de extensão, localmente porfiríticos, de composição variando de granodiorito a tonalito. Não apresentam deformação e são claramente intrusivos nas supracrustais, tendo-se colocado possivelmente durante períodos de atividade tardi-tectônica na evolução do *greenstone belt* (Kishida, 1979).
- Dioritos, sills gabróides e dacitos ocorrem geralmente próximos ao contato entre o DVF e DS. Adicionalmente, diques básicos concordantes também

ocorrem nos gnaisses bandados das margens dos domos. Possuem composição ortoanfibolítica, constituídos de hornblenda e plagioclásio. Os sills gabróides são sítios preferenciais para as mineralizações de ouro, em geral quando estão associados a zonas de cisalhamento e veios de quartzo.

2.2.2 - Metamorfismo

Com base nas relações de campo e nos estudos petrográficos e petrológicos, Silva (1983) definiu três eventos metamórficos distintos na sequência supracrustal do *greenstone belt* do Rio Itapicuru.

O primeiro (M_1), de natureza hidrotermal, típico de fundo oceânico, hidratou de forma generalizada as paragêneses originais das rochas vulcânicas, alterando-as no sentido da formação de paragêneses espilíticas (hidratada, oxidada e carbonatada) nas rochas máficas, e paragêneses queratofiricas nas rochas félsicas. Outras evidências desse evento metamórfico são veios de clorita e carbonato preenchendo fraturas de resfriamento nas *pillow*-lavas basálticas, além de albitização das bordas das *pillows* e das fraturas de resfriamento.

O segundo evento (M_2), de âmbito regional, mascara quase que totalmente as evidências do evento anterior e as estruturas primárias. Esse evento é de natureza dinamotermal e sincrônico à colocação dos domos granito-gnáissicos. Causou metamorfismo da fácies xisto-verde em toda área da sequência supracrustal e metamorfismo fácies anfibolito nas áreas adjacentes aos contatos dos domos.

O último evento (M_3) está relacionado à intrusão de pequenos corpos tardi-tectônicos, dando origem a uma auréola de contato na fácies hornblenda-hornfels em torno dos mesmos e está superimposto ao evento anterior.

A Tabela 2.1 mostra associações mineralógicas desses eventos metamórficos nas rochas máficas do *greenstone belt* do Rio Itapicuru, junto com P-T estimadas, obtidas por Silva (1984).

EVENTO METAMÓRFICO	FÁCIES	ASSEMBLÉIA MINERAL	P (Kb)	T (°C)
M1 (fundo oceânico)	xisto-verde	clorita, albita, calcita, quartzo, epidoto, hematita, leucoxênio.	0.2	<400
M2 (regional)	xisto-verde Ep-anfibolito Hb-anfibolito Hb-hornfels	clorita, albita, calcita, quartzo, epidoto, hematita. actinolita, albita, calcita, quartzo, epidoto, clorita, hematita. hornblenda, labradorita, andesina. hornblenda, andesina, almandina.	2 - 4	400-600
M3 (contato)	hornfels	hornblenda, andesina.	>2	500-600

Tabela 2.1 - Associações metamórficas das rochas máficas do *greenstone belt* do Rio Itapicuru e suas estimadas condições de P-T (Silva, 1984; *apud* Xavier, 1991).

2.2.3 - Geologia Estrutural

A principal característica estrutural do *greenstone belt* do Rio Itapicuru é um *trend* norte-sul nos seus setores setentrional e central, e leste-oeste no setor meridional, o que resulta em uma sucessão de antiformes e sinformes com eixos orientados segundo esses *trends* (Kishida & Riccio, 1980; Davison *et al.*, 1988).

Zonas de cisalhamento, paralelas ou subparalelas ao acamamento (S_0) e à foliação (S_1), são caracterizadas nos três setores mencionados, com direção norte-sul nos primeiros e leste-oeste no último (Rocha Neto, 1994).

No setor central do *greenstone belt*, as rochas do DVM são foliadas na direção aproximada norte-sul, com mergulho variando entre 50° e 70° para oeste. Sedimentos intercalados nos basaltos do DVM têm o acamamento S_0 paralelo à foliação S_1 . As rochas do DVF e do DS exibem os mesmos traços estruturais do DVM. Nelas é possível observar, tanto nos tufos como nos sedimentos, dobras menores com clivagem de plano axial. Alguns afloramentos do DS ao longo do Rio Itapicuru são marcados por uma foliação, em cujos planos as micas estão orientadas paralelamente ao acamamento S_0 e à foliação regional S_1 . A mesma foliação de direção norte-sul como mergulho para oeste ocorre no setor setentrional do *greenstone belt*. Em diversos locais essa foliação encontra-se milonitizada (Rocha Neto, 1981).

As múltiplas deformações da sequência supracrustal do *greenstone belt* do Rio Itapicuru foram estudadas inicialmente por Sá (1982), próximo ao domo de Ambrósio e no setor meridional do *greenstone belt*. Os resultados obtidos por Sá (1982) nessa região foram confirmados por Teixeira (1984) para o vale do Rio Itapicuru, no setor central da sequência. As fases de deformação determinadas por esses autores e um resumo dos eventos relacionados a cada fase são mostrados na Tabela 2.2.

EVENTO	CARACTERÍSTICAS
D ₁	Transposição de S ₀ e geração de fábrica planar composta S ₀ ~S ₁ .
D ₂	Dobramento isoclinal apertado de grande amplitude com eixo N-S e crenulação da foliação S ₀ ~S ₁ . Dobramento F ₂ com eixo E-W (Setor Meridional).
D ₃	Dobras F ₃ , verticalizadas, de eixo E-W. Clivagem de crenulação S ₃ paralela ao plano axial das dobras.
D ₄	Clivagem de crenulação S ₃ gerada por dobras abertas. Planos axiais verticais de direção NE-SW.
D ₅	Tectônica rúptil relacionada ao nível crustal mais elevado. Falhamentos de direção N-S e seus pares conjugados NE-SW e NW-SE.

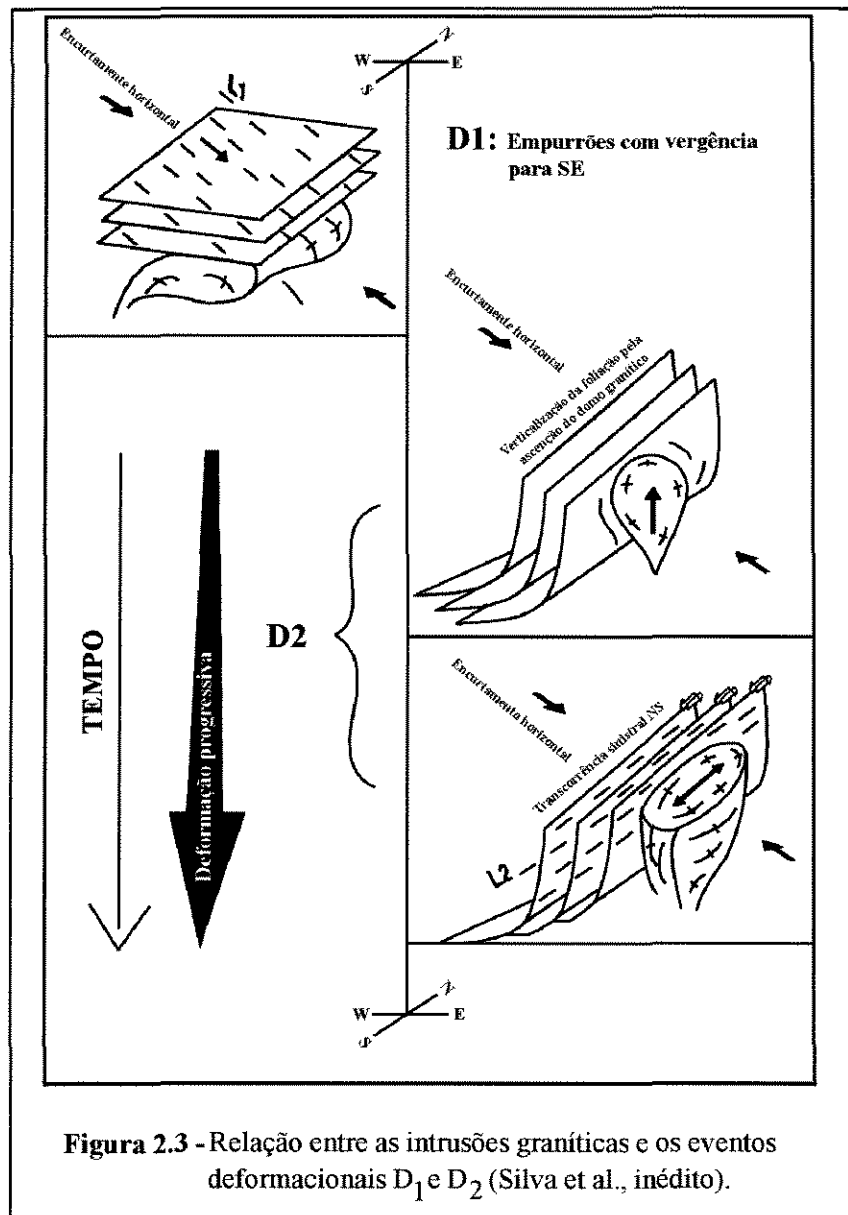
Tabela 2.2 - Evolução tectônica dos domínios central e meridional do *greenstone belt* do Rio Itapicuru, segundo Sá (1982) e Teixeira (1984).

Silva & Matos (1991), utilizando o modelo de evolução geotectônico proposto por Silva (1987) para o *greenstone belt* do Rio Itapicuru, interpretaram a evolução estrutural dessa entidade de maneira distinta dos autores prévios. A sua interpretação é mostrada na Tabela 2.3.

Fase de deformação	Evento	Fenômenos
D ₁	E ₁	Desenvolvimento de zonas de cisalhamento N-S, decorrentes de empurrões durante o fechamento de bacia back-arc S ₁ milonítica.
	E ₂	Dobramento da sequência em sinclinais e anticlinais com vergência E. Tectônica tangencial marcada pela ascensão de corpos graníticos. Metamorfismo regional.
D ₂		Dobramento regional de grande amplitude com envolvimento do embasamento.

Tabela 2.3 - Evolução tectônica do *greenstone belt* do Rio Itapicuru, segundo Silva & Matos (1991).

Silva *et al.* (inédito) consideram que evolução estrutural do *greenstone belt* do Rio Itapicuru ocorreu em dois eventos deformacionais progressivos. Sendo o primeiro tangencial (D_1), seguido por um segundo transcorrente (D_2) (Figura 2.3).



As dobras em escala quilométrica e plano axial vertical foram formadas no evento tectônico D_2 em resposta a colocação dos granitos Transamazônicos. Este evento é caracterizado por um cisalhamento sinistral N-S, foliação sub-vertical e lineação de estiramento sub-horizonta. O evento tectônico D_2 é o evento mais conspícuo do *greenstone belt* do Rio Itapicuru.

Na parte sudeste do *greenstone belt* do Rio Itapicuru o padrão de foliação não apresenta uma geometria regular. Cisalhamento dextral e sinistral e foliação com *trend* E-W são observados. Este padrão não pode ser atribuído à tectônica D₂ descrita anteriormente. O evento deformacional D₁ é interpretado como compressional e responsável pela principal foliação das supracrustais.

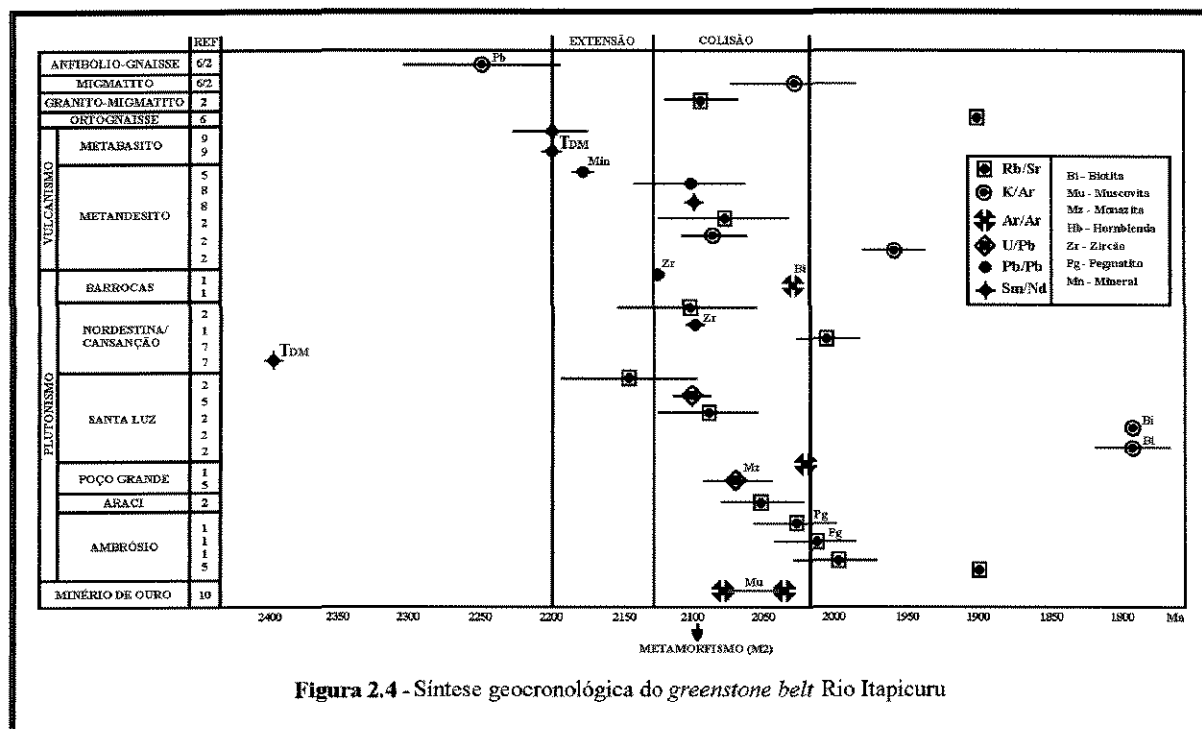
Superposição de estruturas D₁ por estruturas D₂ demonstram o retrabalhamento do evento D₁ de *trend* E-W a NW-SE por *trend* N-S do evento tectônico D₂.

A existência da tectônica D₁ na porção norte do *greenstone belt* do Rio Itapicuru pode ser questionada. Porém evidências metamórficas e de deformação finito surgem que de fato o evento ocorreu e foi posteriormente transposto por D₂.

2.2.4 - Geocronologia

A idade do *greenstone belt* do Rio Itapicuru ainda é controvertida. Neves *et al.* (1980), datando rochas granitóides e metavulcânicas félsicas da região pelo método Rb/Sr, encontraram valores na ordem de 2000 Ma. Este fato levou alguns autores a classificarem o *greenstone belt* do Rio Itapicuru como uma sequência vulcano-sedimentar do Proterózoico Inferior (Marinho & Sabaté, 1982). Outros consideram as idades Rb/Sr apenas como indicadores de aquecimento, relacionados aos picos geotectônicos, e concluem que as características litológicas, litoquímicas e estruturais destes terrenos permitem considerá-los como típicos segmentos de crosta arqueana preservada em baixo grau metamórfico (Kishida, 1979; Kishida & Riccio, 1980). Mais recentemente, uma datação U/Pb de 2930 Ma foi obtida para um megaxenólito hospedado no gnaiss do domo de Ambrósio, indicando a existência de um embasamento arqueano abaixo das unidades supracrustais (Gáal *et al.*, 1987).

Os dados geocronológicos disponíveis atualmente para sequência supracrustal e para as suítes plutônicas do *greenstone belt* do Rio Itapicuru estão agrupadas na Figura 2.4, ilustrando a sequência dos eventos tectonometamórfico/magmáticos ocorrido na região (Mello *et al.*, 1996).



Segundo Silva *et al.* (inédito), um modelo de resfriamento lento das rochas graníticas após a sua intrusão, parece ser o mais realista. Envolvendo taxas de resfriamento da ordem 4°C/Ma que se ajustam a um ambiente tectônico dominado por transcorrências horizontais.

Assim sendo, os dois eventos metamórfico/estruturais D₁ e D₂ que encerram o fechamento da bacia do *greenstone belt* do Rio Itapicuru pertencem a um processo tectônico contínuo que começou em 2127 Ma e se manteve até 2020 Ma.

2.2.5 - Evolução Geotectônica

Segundo Silva *et al.* (inédito), os dados geocronológicos obtidos através de Ar/Ar e Pb/Pb demonstram um processo lento e contínuo que se inicia em 2130 Ma e termina em 2020 Ma com o fechamento do *greenstone belt* do Rio Itapicuru. Esse processo contínuo é sustentado por condições metamórficas fracamente contrastantes entre D₁ e D₂.

As unidades vulcano-sedimentares paleoproterozóicas devem ter se depositado em uma fina crosta continental em 2.200 Ma.

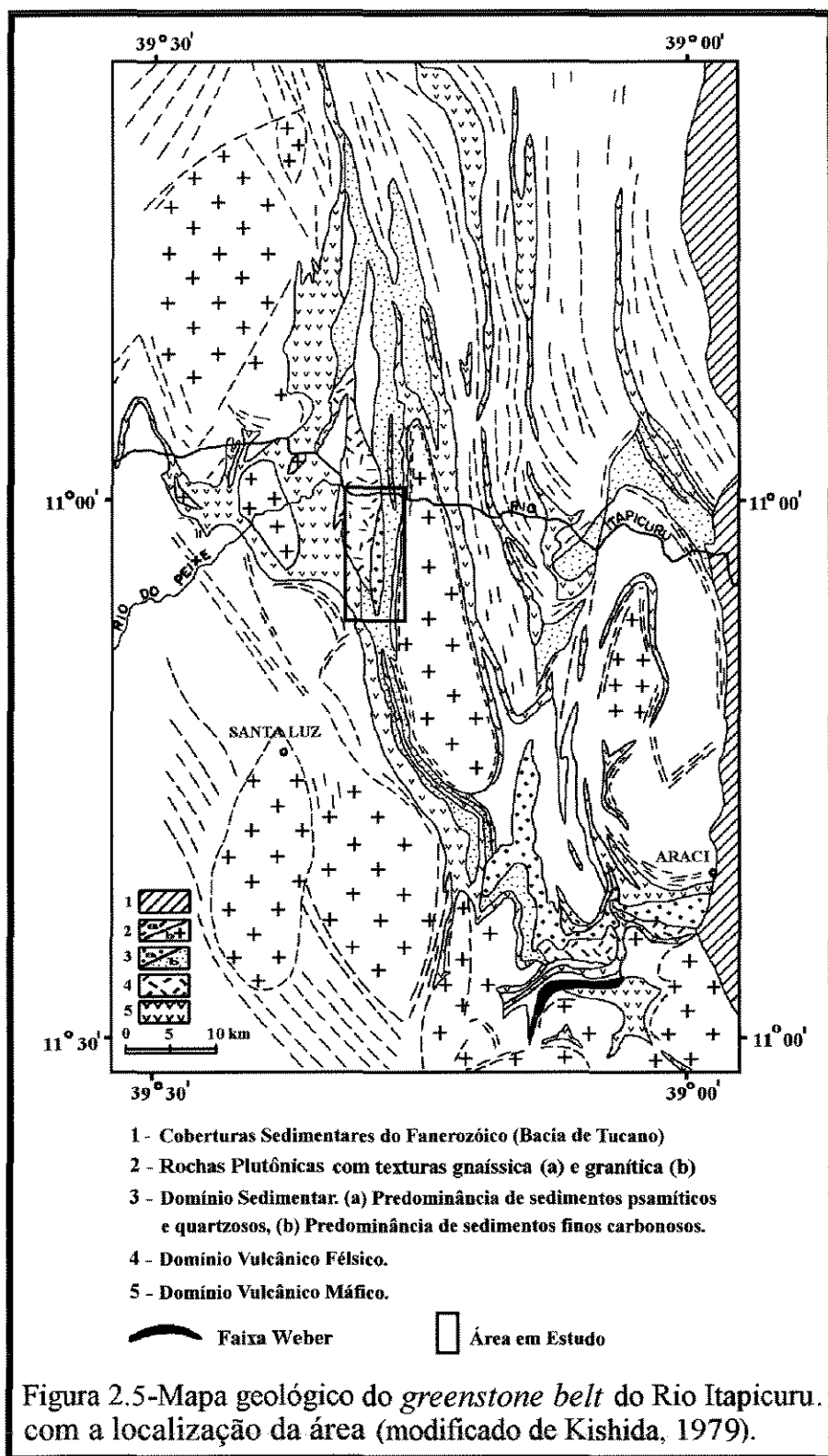
A direção de compressão foi NW-SE e desenvolveu empurrões sin-metamórficos com vergência para SE. A primeira indicação de plutonismo se deu em 2127 Ma com o massiço Barrocas durante D_1 . A maioria das intrusões graníticas ocorreu em torno de 2100 e 2070 Ma, e devido à sua quantidade mudaram o estilo deformacional. O cisalhamento horizontal dos empurrões não pode mais acomodar o encurtamento devido às intrusões e iniciou-se uma tectônica transcorrente. As intrusões são responsáveis pelos dobramentos em escala quilométricas e verticalização da foliação D_1 .

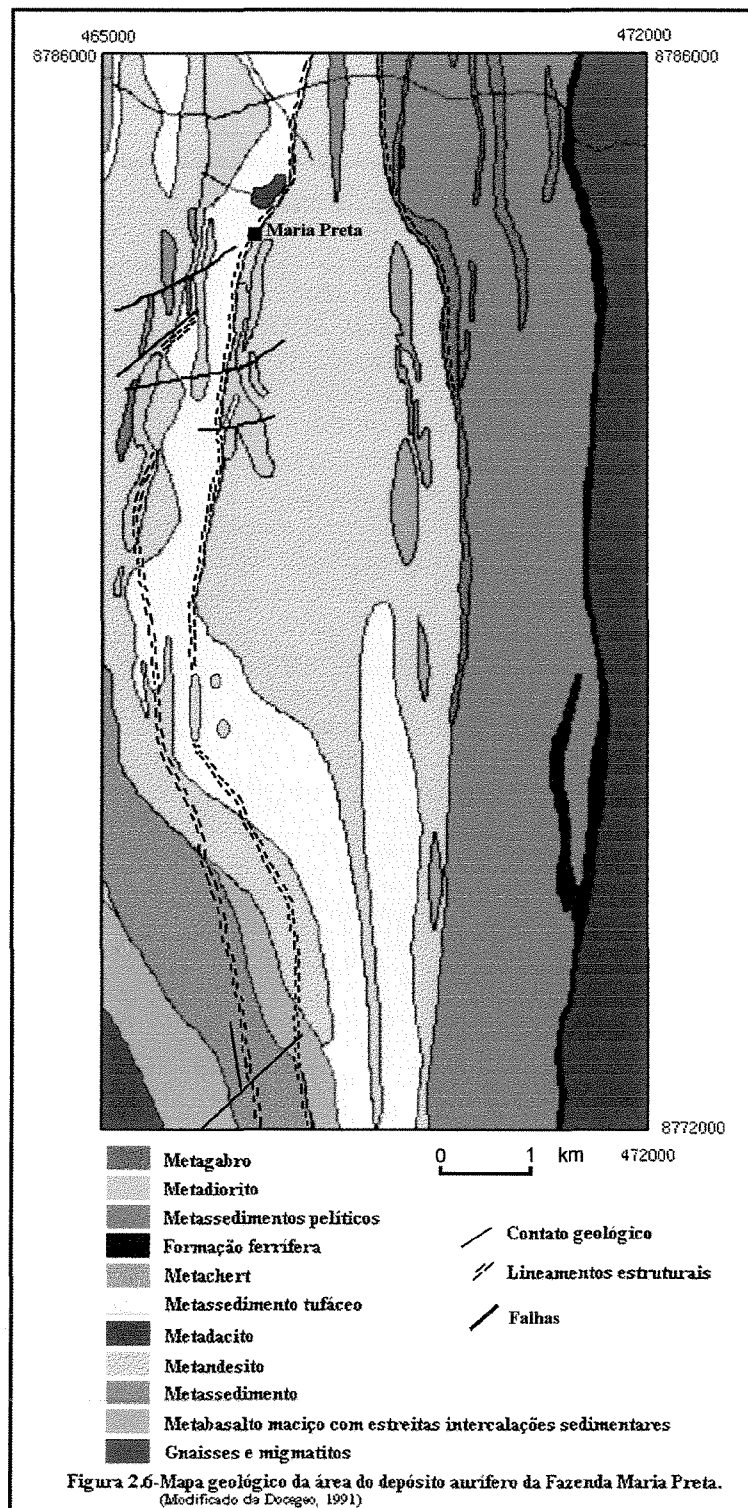
Assim, a mesma compressão NW-SE atuando agora sob um foliação sub-vertical e *trend* N-S dá início a um cisalhamento sinistral, característico de D_2 .

2.3 - Geologia Local

A área de enfoque desse estudo faz parte da porção média do *greenstone belt* do Rio Itapicuru, onde está localizado o depósito aurífero da Fazenda Maria Preta (Figura 2.5).

A área é constituída principalmente pelos Domínio Vulcânico Félsico e Domínio Sedimentar, sendo que apenas na porção sudeste aparece o Domínio Vulcânico Máfico (Figura 2.6). No âmbito desta classificação, os principais litotipos são metandesitos ácidos, metadacitos, metariolitos, corpos intrusivos de natureza diorítica, metassedimentos de natureza pelítica-psamítica, grauváquica a turbidítica, vulcanoclásticas carbonosas e metabasaltos. Tais litotipos foram submetidos a processos de metamorfismo no fácies xisto-verde, alteração hidrotermal e deformação (geração de zonas de cisalhamento dúctil-rúptil), os quais dificultam em muito o reconhecimento da mineralogia e composição química original, gerando litotipos carbonatados, sericitizados, cloritizados e albitizados, em proporções variáveis (Foto 2.1).





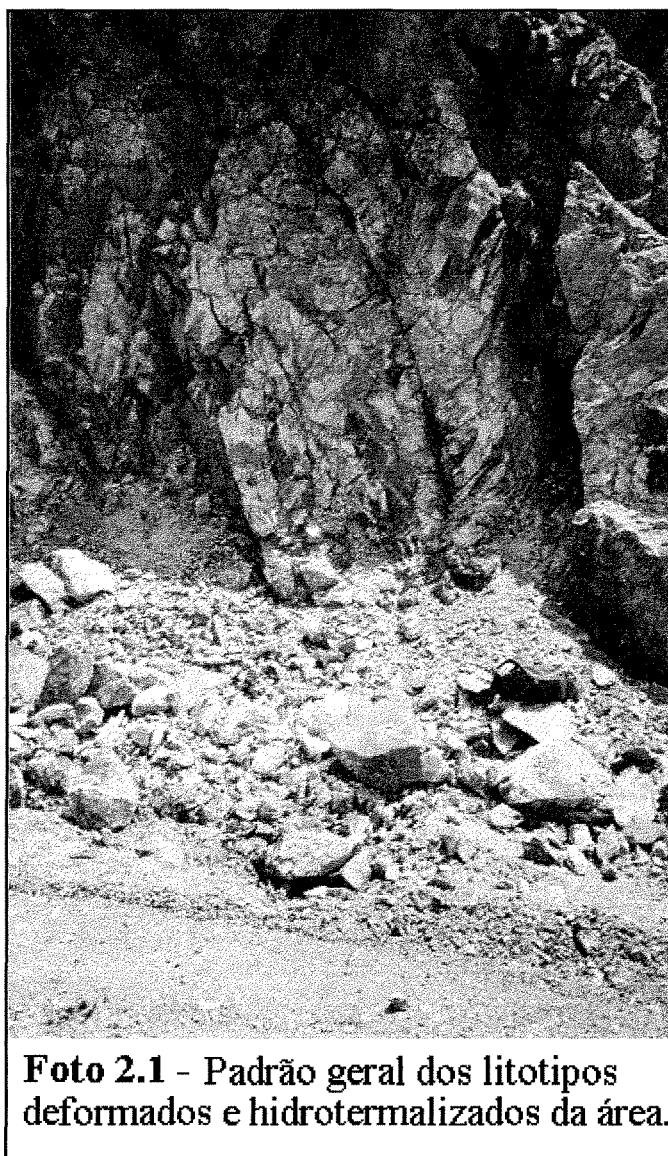
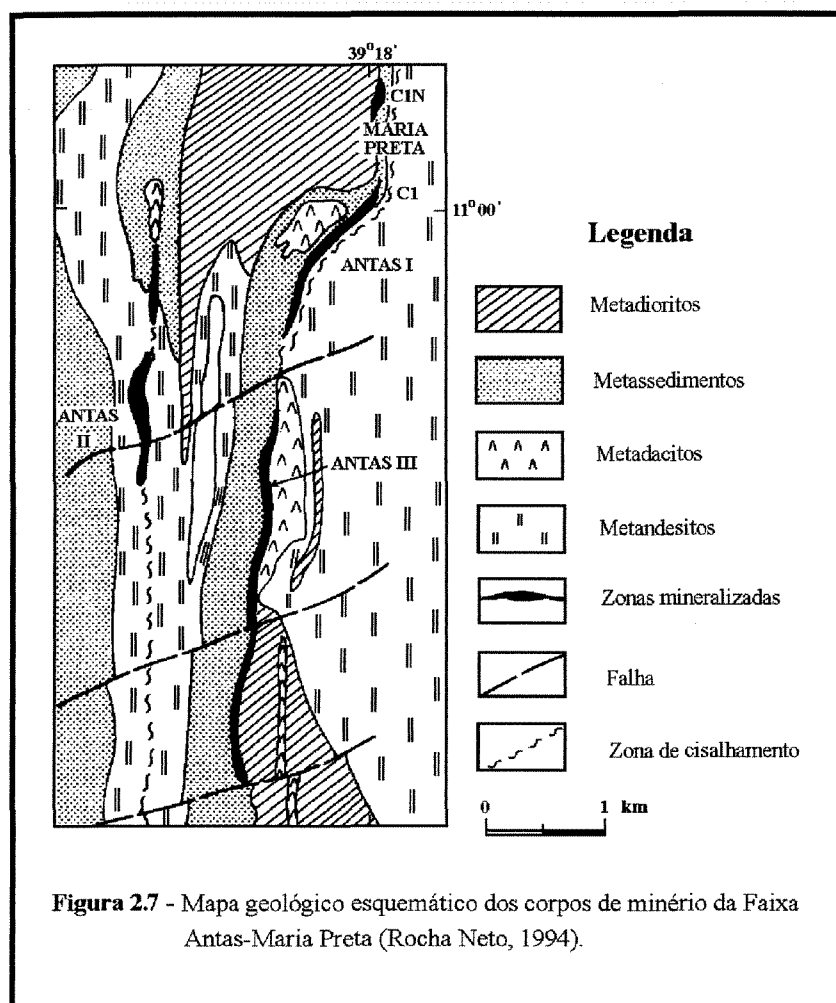


Foto 2.1 - Padrão geral dos litotipos deformados e hidrotermalizados da área.

2.4 - Mineralização e Alteração Hidrotermal

As principais ocorrências auríferas do depósito da Fazenda Maria Preta concentram-se na Faixa Antas-Maria Preta, que corresponde a uma zona de cisalhamento rúptil-dúctil de direção N-S com mais de 15 quilômetros de extensão e espessura entre 10 e 100 metros. Dentro dessa faixa estão localizados os corpos mineralizados C1N, C1, Antas I, II e III. Esses corpos estão associados a processos de alteração hidrotermal em zonas de intensa deformação, em contato com metassedimentos carbonosos, metandesitos, metariodacitos e metadioritos (Silva & Matos, 1987; Rocha Neto, 1994) (Figura 2.7).



Os corpos de minério têm geometria aproximadamente tabular. A direção aproximada é norte-sul e o mergulho é para oeste, variando entre 40° e 70°. A extensão dos corpos em profundidade parece ser controlada por um *plunge* de 20° para norte (Robert, 1992).

Segundo Xavier (1991), a alteração é comum dentro dos domínios das zonas de cisalhamento, sendo representada principalmente por carbonatação, sericitização, silicificação e albitização. A alteração evoluiu com diferentes graus de intensidade ao longo da sequências metavulcânicas e metagrauvas e nos corpos subvulcânicos, particularmente nos metariorodacitos.

A seguir será apresentada uma breve descrição dos tipos de alterações hidrotermais encontradas no depósito aurífero da Maria Preta, de acordo com Xavier (1991).

A carbonatação é comum dentro das zonas de cisalhamento, sendo particularmente bem desenvolvida na sequência metavulcânica. Dentro dessa sequência, a carbonatação é marcada em seu estágio inicial por carbonato finamente disseminado na matriz da metavulcânica, ocasionalmente pequenos veios de carbonato paralelos à foliação e agregados irregulares de carbonato dentro de restos da rocha vulcânica original. Com o desenvolvimento da carbonatação, dominam pequenos veios de carbonato com mais de 2 mm de espessura e *pods* de carbonato tipo *augen*, variando de 1 a 2,5 mm de tamanho. Estas feições encontram-se geralmente dispostas ao longo da foliação ou são envoltas por esta, sugerindo que a carbonatação foi gerada concomitantemente às zonas de cisalhamento.

A formação de mica branca em todas as litologias investigadas marca o processo de sericitização em todos os domínios das zonas de cisalhamento. Onde a carbonatação ocorre juntamente com a sericitização, a mica branca forma domínios de clivagem penetrativa em um padrão anastomosado ao redor das zonas carbonatadas e menos alteradas da rocha. Isso indica que os dois processos ocorreram concomitantemente, ou que a sericitização foi pouco posterior à carbonatação. Nesses domínios a mica branca parece estar substituindo a clorita formada por alteração de minerais ferromagnesianos primários oriundos do metamorfismo na fácies xisto-verde, embora nenhuma evidência dessas fases minerais tenha sido reconhecida em estudo petrográfico.

A sericitização é o processo de alteração dominante das porções de alta deformação nas zonas de cisalhamento, e afetada particularmente as metavulcânicas e metagrauvas que são parcial ou totalmente transformadas em filonitos. Dentro dessas zonas de alta deformação, as unidades carbonosas da sequência de metagrauvas mostram abundância de veios de quartzo-carbonato-albita que são hospedeiros da maioria dos corpos mineralizados na Fazenda Maria Preta. Em seções delgadas, a formação de filonitos é marcada por um aumento na quantidade de mica branca fortemente orientada, e também por uma diminuição em plagioclásio e clorita metamórfica, perda de quartzo, forte clastos e a reconcentração do material carbonoso.

A silicificação e a albitização não são tão comuns como a carbonatação e só podem ser reconhecidas nas partes mais internas das zonas de cisalhamento. A silicificação é acompanhada

subordinadamente por albitização, afetando principalmente os corpos de riodacitos, ao longo de contatos litológicos com as sequências de metavulcânicas e de metagrauvacas, na parte sul da zona de cisalhamento (corpo Antas III), onde elas constituem o principal hospedeiro da mineralização de ouro.

Barrueto *et al.* (1996) descrevem corpos de quartzo-feldspato pórfiro sódico, álcali-traquito e lamprófito em íntima associação com as mineralizações aurífera no *greenstone belt* do Rio Itapicuru. Portanto, esses autores advogam que a natureza sódica dos corpos pode ser primária, e não derivada de um processo metassomático posterior, no caso a albitização.

A silicificação ocorre de forma mais restrita nas metavulcânicas e metassedimentos, onde pequenos veios de quartzo de espessura individual centimétrica se fundem em massas de quartzo irregular, ambas mostrando contatos irregulares com as rochas hospedeiras e, portanto, surgindo substituição de sílica nas rochas.

Desta forma, a silicificação parece ser um processo de alteração sin à pós tectônico sobreposto aos metariodacitos, metatufos e metandesitos e mostrando uma associação com veios de quartzo tardios.

CAPÍTULO 3

3 - ANÁLISES DOS DADOS DE ESPECTROMETRIA DE REFLEXÃO

3.1 - Introdução

Os diferentes materiais que compõem a superfície terrestre caracterizam-se por apresentar um comportamento espectral típico. O conhecimento desse comportamento espectral é de extrema importância em sensoriamento remoto, pois através dele pode-se discriminar e qualificar a informação contida em uma imagem. Nesse sentido, há uma constante preocupação na caracterização do comportamento espectral dos diferentes materiais determinando-se as feições de absorção típica para cada material. Para o caso específico de minerais e rochas, grande atenção tem sido dada aos produtos de alteração hidrotermal, feições estas que podem ser correlacionadas a mineralizações (Hunt & Salisbury, 1970; Hunt, 1979; Hunt & Ashley, 1979; Goetz *et al.*, 1982; Crowley, 1984; Krohn, 1986; Grove *et al.*, 1992). Entretanto, a utilização da informação espectral com fins prospectivos tem sido restrita às regiões de clima árido e semi-árido, onde o intemperismo é praticamente ausente e o material oxidado geralmente se associa à oxidação de sulfetos hidrotermais, ao contrário de regiões tropicais e subtropicais, onde o intemperismo e a laterização das rochas são generalizados.

Para estas regiões, nas quais se inclui o Brasil, a utilização da informação espectral requer uma análise adicional sobre os processos de intemperismo supergênico e de seus efeitos sobre o comportamento espectral de diferentes tipos litológicos. Torna-se então necessário adaptar os padrões obtidos em climas áridos e semi-árido aos padrões típicos dos climas tropicais e subtropicais. A importância dessa adaptação reside no fato de que, em nosso país, muitas das jazidas estão cobertas por um manto intempérico, sendo então essa caracterização espectral um instrumento importante nos trabalhos de prospecção mineral utilizando sensoriamento remoto.

Os resultados das análises de espectrometria de reflexão obtidos para a região do depósito da Fazenda Maria Preta aqui apresentados objetivam acrescentar novos dados aos trabalhos já existentes no Brasil (Meneses, 1986; Paradela, 1986; Crósta, 1990; Vitorello &

Galvão, 1992; Crósta & Rabelo, 1992, 1993; Crósta, 1993; Ferreira *et al.*, 1993; Meneses *et al.*, 1993; Hernandes, 1994). Esses dados passam a ter grande importância com a utilização de sensores de maior resolução espectral em território brasileiro, como é caso do Geoscan AMSS MK-II e do JERS-1.

3.2 - Características Espectrais de Minerais de Interesse à Prospecção Mineral.

Os minerais de alteração hidrotermal possuem, em sua composição, átomos e moléculas que determinam suas propriedades espectrais, que por sua vez definem o seu comportamento ao longo do espectro eletromagnético (Hunt & Salisbury, 1970; Hunt *et al.*, 1973; Hunt & Ashley, 1979; Goetz & Rowan, 1981).

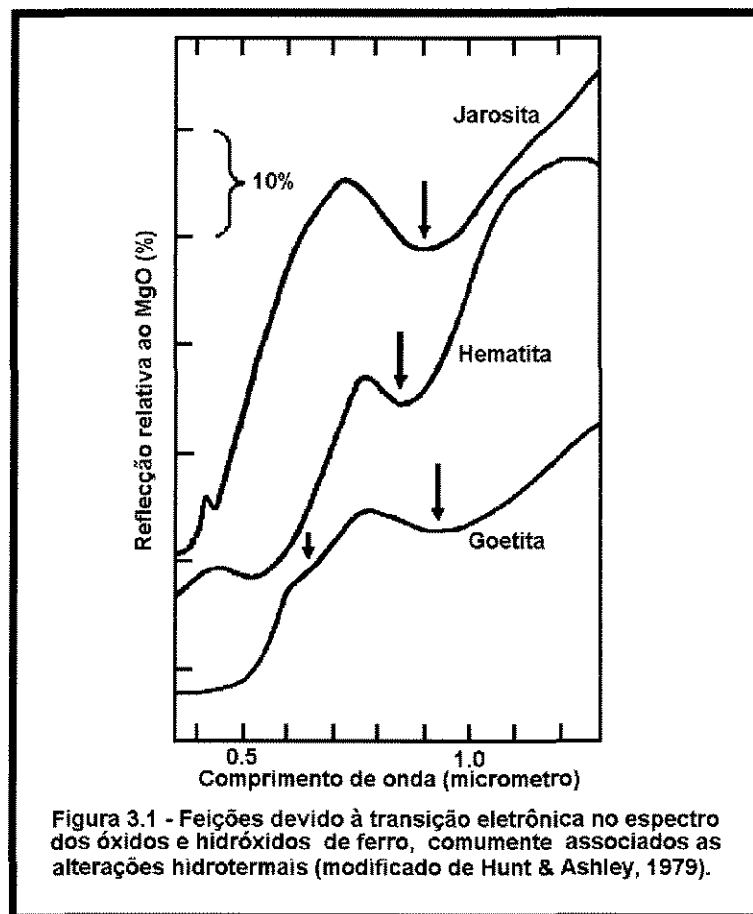
Em sensoriamento remoto, o intervalo do espectro mais utilizado para a determinação destes minerais encontra-se entre 0,40 e 2,50 μm , pois neste intervalo situam-se as "janelas atmosféricas", as quais permitem ao espectro eletromagnético atingir a superfície terrestre. Este intervalo do espectro é subdividido em dois sub-intervalos: entre 0,40 e 1,00 μm (visível e infravermelho próximo) e entre 1,40 e 2,40 μm (infravermelho de ondas curtas).

Dentre as associações minerais passíveis de detecção por sensores remotos estão os óxidos/hidróxidos de ferro, os minerais que contêm a molécula de hidroxila (O-H) e os carbonatos, todos com potencial para uso em exploração mineral.

O intervalo de 0,40 a 1,00 μm é utilizado para avaliar a presença do íon férrico, associado a minerais do grupo dos óxidos/hidróxidos de Fe^{+3} . Dois tipos de feições de absorção de energia caracterizam o íon férrico nesse intervalo, ambas do tipo **eletrônico**, pois são produzidas ao nível dos elétrons que o compõem (Hunt & Salisbury, 1970). O primeiro tipo é denominado **transferência de carga** e no íon férrico é representado por uma absorção generalizada que ocorre do ultravioleta diminuindo progressivamente em direção à região do visível. O segundo tipo é denominado de **efeito de campo cristalino**, aparecendo associado aos minerais hematita, goetita, limonita e jarosita, representado por três feições de absorção mais

localizadas e de menor amplitude, situadas respectivamente por volta de 0,45, 0,65 e no intervalo 0,85-0,95 μm , dependendo do mineral considerado (Figura 3.1).

Na Figura 3.1 o efeito de transferência de carga é representado por uma queda generalizada da reflectância entre 0,60 e 0,40 μm , enquanto que as setas mostram a posição das feições de absorção características do efeito de campo cristalino para alguns minerais contendo o íon férrico.



O intervalo entre 1,40 e 2,40 μm contém as principais feições diagnósticas de vários minerais de alteração hidrotermal, entre eles caolinita, pirofilita, alunita, montmorilonita, sericita, buddingtonita, clorita, epidoto e dickita - todos estes possuindo em comum a presença da molécula O-H (hidroxila). O processo que produz as feições de absorção nessa região é chamado **vibracional**, sendo causado por transições vibracionais de moléculas do grupo das hidroxilas. As principais feições de absorção características dos minerais que contêm hidroxilas estão

situadas respectivamente por volta de 1,40, 1,90, 2,20 e 2,30 μm , além de várias outras feições subsidiárias. Essas feições são caracterizadas por intensa absorção de energia nessa região, exibindo em decorrência inflexões características na curva espectral desses minerais (Figura 3.2). As feições situadas próximas a 1,40 e 1,90 μm , contudo, coincidem com a molécula água e no solo, presente na atmosfera, fato que dificulta o uso desses dois intervalos em sensoriamento remoto. As feições próximas a 2,20 e 2,30 μm são típicas dos minerais com radical O-H, sendo que, a feição em torno de 2,20 μm é típica dos minerais ricos em alumínio (Al-OH) (Hunt *et al.*, 1973) e em torno de 2,30 μm é típica dos minerais ricos em magnésio (Mg-OH) (Hunt & Salisbury, 1970). Essas diferentes posições de absorção possibilitam a distinção desses dois tipos de minerais na ausência de carbonatos, os quais possuem absorção em torno de 2,35 μm . Os carbonatos também apresentam feições típicas nesta faixa do espectro, em torno de 2,35 e 2,53 μm , devido às vibrações do radical CO^{+3} .

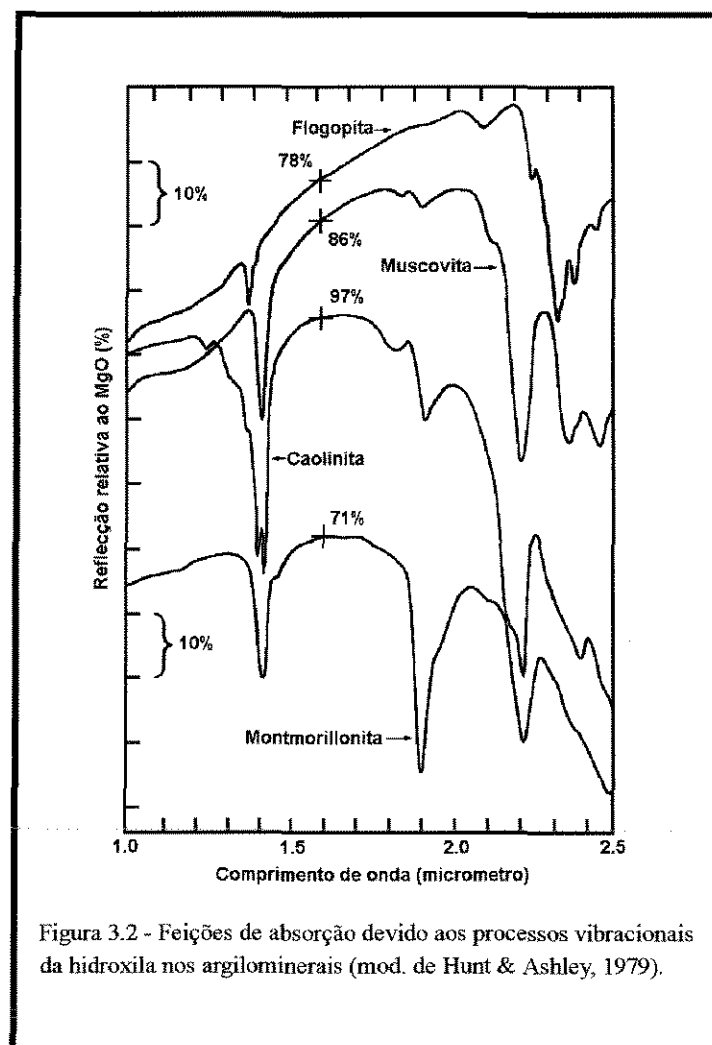


Figura 3.2 - Feições de absorção devido aos processos vibracionais da hidroxila nos argilominerais (mod. de Hunt & Ashley, 1979).

As feições espectrais das regiões 0,40-1,00 e 1,40-2,40 μm , diagnósticas dos minerais mencionados, tornam possível a identificação dos mesmos em imagens de sensoriamento remoto. Para que isto ocorra é necessário o conhecimento das curvas espectrais dos minerais mencionados e um sensor capaz de imagear faixas específicas do espectro eletromagnético que se enquadrem nas posições de absorção dos diferentes minerais. Além disso, para que as informações espectrais contidas nas imagens digitais tornem-se perceptíveis ao intérprete, é necessário que as mesmas sejam submetidas a técnicas de processamento digital.

3.3 - Metodologia

A metodologia empregada consistiu, primeiramente, em fazer o processamento digital das imagens Geoscan AMSS MK-II do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta, usando a técnica chamada "Feature-Oriented Principal Components Selection (FPCS)" (Crósta & Moore, 1989; Loughin, 1991). Essa técnica necessita o conhecimento prévio das curvas espectrais dos minerais associados a alteração hidrotermal. Estas curvas foram obtidas a partir das bibliotecas espectrais do JPL e do USGS (Grove *et al.*, 1992; Clark *et al.*, 1993), que foram utilizadas como base para identificar as anomalias espectrais dos minerais de interesse, descritos em trabalhos prévios realizados em Maria Preta.

Com os produtos do processamento digital e com auxílio dos mapas geológicos da área, foram selecionados oito alvos de interesse para as coletas de amostras de solo, para posterior análise espectral em laboratório. Os resultados desta análise, bem como uma discussão dos mesmos, são apresentados neste capítulo.

A amostragem foi realizada através de perfis nos alvos selecionados. Foram coletadas amostras de solo até uma profundidade de aproximadamente 30 cm, sobre as rochas hidrotermalizadas e encaixantes. Também foram coletadas duas amostras do minério intemperizado, em frentes de lavra, numa profundidade aproximada de um metro. Essa amostragem teve como objetivo analisar o comportamento espectral dos solos residuais das rochas hidrotermalizadas e das encaixantes.

Das 45 amostras coletadas, 15 amostras de 5 alvos foram selecionadas para a realização das análises espectrais e de difratometria de raios-X. Destas amostras selecionadas, 13 são de solo e 2 são amostras de minério. Elas foram coletadas nos alvos Antas III/Corpo 1, Antas III/Corpo 3, Antas II/Corpo 1, Lajinha Norte e Saco III (Figura 3.3). Essas análises foram realizadas com a finalidade de caracterizar a composição mineralógica e o comportamento espectral dos diferentes solos residuais e rochas da região. A partir da combinação do conhecimento da composição mineralógica e do comportamento espectral dos solos e rochas da área e com os produtos do processamento digital das imagens, foi possível discriminar áreas com minerais de interesse à exploração.

Em seguida procedeu-se à preparação das amostras para a realização das análises de espectrometria de reflexão e de difratometria de raios-X. Esta consistiu inicialmente na retirada de material grosseiro, tais como fragmentos de rochas, quartzo e materiais orgânicos através de uma peneira de 60 mesh. Em seguida, foram separadas três porções: para análise de difratometria de raios-X, para análise de espectrometria de reflexão e para *back-up*.

A difratometria de raios-X foi realizada no Laboratório Central de Análises Minerais (LAMIN), da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (Tabelas 3.1 a 3.4).

As análises de espectrometria de reflexão foram realizadas no Desert Research Institute (DRI), da Universidade de Nevada, Reno, USA, utilizando-se de um espectroradiômetro Beckman, modelo UV-5240 (Tabela 3.5).

As curvas espectrais apresentaram alguns problemas entre 400 e 600 nm. Porém, neste trabalho não dificultou a interpretação das curvas, pois este intervalo não é importante para a identificação dos minerais desejados. Contudo, este intervalo é de suma importância no estudo da assinatura espectral dos minerais, pois mostra a feição de absorção de transferência de carga do íon férrico.

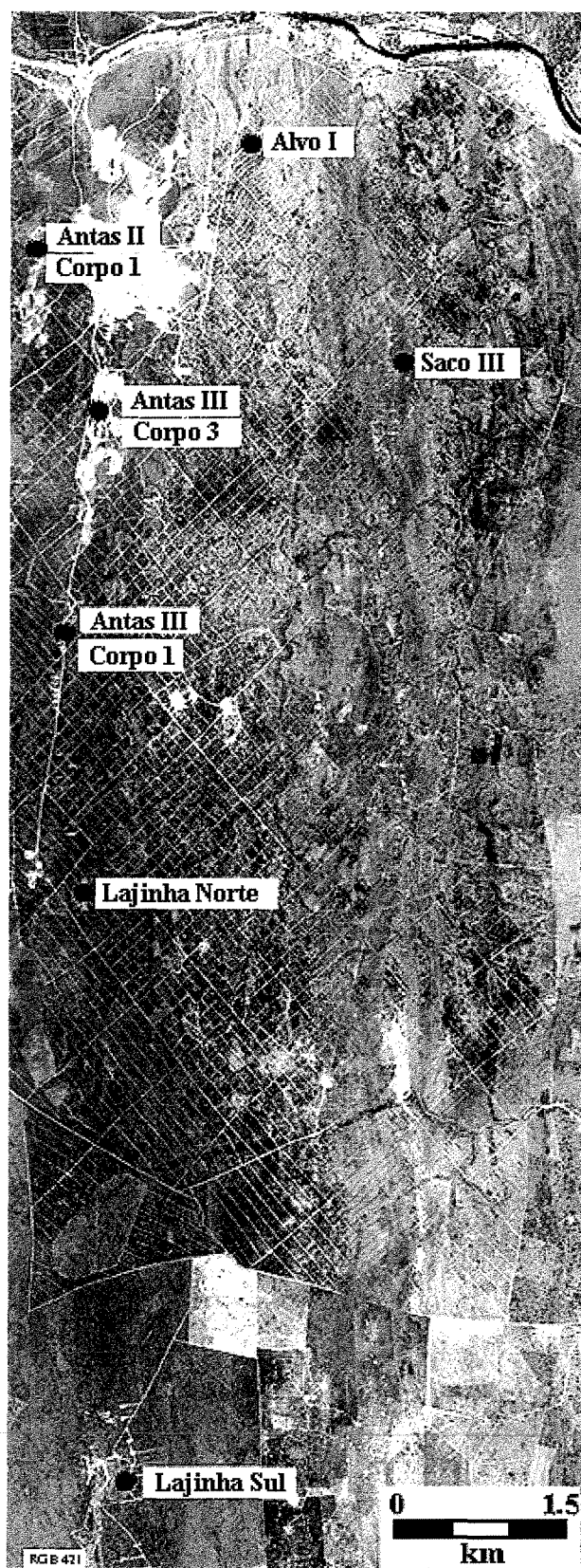


Figura 3.3 -Localização dos alvos de coleta de solos e rochas

ALVO	AMOSTRA/ CORPO/ LITOLOGIA	ANÁLISE MINERALÓGICA GLOBAL	ANÁLISE MINERALÓGICA SEMIQUANTITATIVA PARA OS MINERAIS DE ARGILA
Antas III	AN-01 / Corpo I Encaixante	Quartzo, grupo da caolinita, grupo das micas, minerais de argila, feldspato, calcita (traços)	grupo da caolinita (31%), illita (55%), grupo da esmectita (6%), clorita (5%), camada mista irregular de illita-esmectita (5%)
	AN-02 / Corpo I Minério	Quartzo, grupo das micas, minerais de argila, goetita, feldspato, calcita (traços)	grupo da caolinita (26%), illita (68%), grupo da esmectita (3%), clorita (3%)
	AN-03 / Corpo I Zona Hidrotermalizada	Quartzo, feldspato, grupo das micas, grupo da caolinita, minerais de argila, óxido de ferro amorfo (limonita)	grupo da caolinita (21%), illita (65%), grupo da esmectita (30%), camada mista irregular de illita- esmectita (11%)
	AN-04 / Corpo III Zona Hidrotermalizada	Quartzo, feldspato, grupo das micas, grupo da caolinita, minerais de argila, hematita, goetita, calcita (traços)	grupo da caolinita (26%), illita (33%), grupo da esmectita (39%), clorita (2%)
	AN-05 / Corpo III Encaixante	Quartzo, feldspato, grupo da caolinita, grupo das micas, minerais de argila, goetita, calcita (traços)	grupo da caolinita (34%), illita (50%), grupo da esmectita (4%), clorita (2%), camada mista irregular de illita-clorita (10%)
	AN-06 / Corpo III Encaixante	Quartzo, feldspato, grupo das micas, minerais de argila, óxido de ferro amorfo (limonita)	grupo da caolinita (16%), illita (82%), camada mista irregular de illita-esmectita (2%)

Tabela 3.1 - Composição mineralógica das amostras analisadas do Alvo Antas III.

ALVO	AMOSTRA/ CORPO/ LITOLOGIA	ANÁLISE MINERALÓGICA GLOBAL	ANÁLISE MINERALÓGICA SEMIQUANTITATIVA PARA OS MINERAIS DE ARGILA
Antas II	AT-01 / Corpo I Minério	Quartzo, grupo das micas, feldspato, calcita, minerais de argila, goetita, hematita, clorita	grupo da caolinita (6%), illita (72%), grupo da esmectita (9%), clorita (2%), camada mista irregular de illita-clorita (11%)
	AT-02 / Corpo I Encaixante	Quartzo, calcita, clorita, grupo das micas, feldspato, minerais de argila, óxido de ferro amorfo (limonita)	grupo da caolinita (23%), illita (40%), grupo da esmectita (24%), clorita (5%), camada mista irregular de illita-clorita (8%)
	AT-03 / Corpo I Encaixante	Quartzo, goetita, hematita, feldspato, minerais de argila, calcita (traços), gibbsita(?) (traços)	grupo da caolinita (8%), illita (70%), camada mista irregular de illita- esmectita (15%)

Tabela 3.2 - Composição mineralógica das amostras analisadas do Alvo Antas II.

ALVO	AMOSTRA/ CORPO/ LITOLOGIA	ANÁLISE MINERALÓGICA GLOBAL	ANÁLISE MINERALÓGICA SEMIQUANTITATIVA PARA OS MINERAIS DE ARGILA
Lajinha Norte	LN-01 Solo Encaixante	Quartzo, feldspato, hematita, goetita, grupo das micas, grupo da caolinita, minerais de argila, calcita (traços)	grupo da caolinita (47%), illita (25%), grupo da esmectita (8%), camada mista irregular de illita-esmectita (13%), camada irregular de illita- clorita (7%)
	LN-02 Solo Encaixante	Quartzo, feldspato, grupo das micas, minerais de argila, óxido de ferro amorfo (limonita), calcita (traços)	grupo da caolinita (42%), illita (37%), grupo da esmectita (7%), camada mista irregular de illita-esmectita (14%)
	LN-03 Solo - Zona Hidrotermalizada	Quartzo, goetita, hematita, grupo das micas, feldspato, grupo da caolinita, minerais de argila	grupo da caolinita (33%), illita (52%), grupo da esmectita (5%), camada irregular de illita-clorita (10%)
	LN-04 Minério	Quartzo, clorita, grupo das micas, hematita, goetita, calcita, feldspato, minerais de argila, turmalina	grupo da caolinita (13%), illita(32%), grupo da esmectita (46%), clorita (9%)

Tabela 3.3 - Composição mineralógica das amostras analisadas do Alvo Lajinha Norte.

ALVO	AMOSTRA/ ALVO/ LITOLOGIA	ANÁLISE MINERALÓGICA GLOBAL	ANÁLISE MINERALÓGICA SEMIQUANTITATIVA PARA OS MINERAIS DE ARGILA
Saco III	SC-01 Solo - Zona Hidrotermalizada	Quartzo, feldspato, óxido de ferro amorfo (limonita), anfíbólio (hornblenda?), turmalina	grupo da caolinita (11%), illita (13%), esmectita (46%), camada mista irregular de illita-esmectita (14%), camada irregular de illita-clorita (16%)
	SC-02 Solo Encaixante	Quartzo, feldspato, anfíbólio (hornblenda?), óxido de ferro amorfo (limonita), minerais de argila, calcita (traços)	grupo da caolinita (15%), illita (7%), grupo da esmectita (62%), camada mista irregular de illita- esmectita (3%), camada irregular de illita-clorita (13%)

Tabela 3.4 - Composição mineralógica das amostras analisadas do Alvo Saco III.

DRI	AN-01, AN-02, AN-03, AN-04, AN-05, AN-06, AT-01, AT-02, AT-03, LN-01, LN-02, LN-03, LN-04, SC-01 e SC-02.
LARAD	AN-00, AN-07, AN-08, AT-04, LN-05, LN-06, LS-01, LS-02, SC-03, SC-04, AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04.

Tabela 3.5

Após a interpretação dos resultados da análise de espectrometria, observou-se que as curvas espectrais dos solos oriundos das encaixantes e das rochas hidrotermalizadas eram muito

similares em todos os alvos. Observou-se também que os resultados semi-quantitativos da difratometria de raios-X eram semelhantes entre si e conflitantes com os resultados da espectrometria. Desta forma, não seria possível diferenciar o comportamento espectral dos solos oriundos das encaixantes e das rochas hidrotermalizadas. Isto ocorreu possivelmente devido à uma amplitude maior da alteração hidrotermal em relação à amostragem e/ou pelo fato dos solos oriundos das rochas hidrotermalizadas e das encaixantes serem similares, isto é, o intemperismo produziria solos mineralogicamente similares tanto das encaixantes como das rochas alteradas hidrotermalmente. Optou-se então em fazer uma nova coleta de amostras de solos. A amostragem foi feita sobre as encaixantes dos 5 alvos selecionados anteriormente, a uma distância entre 30 e 60 metros das rochas hidrotermalizadas. Amostras de solos das rochas hidrotermalizadas e das encaixantes também foram coletadas em dois novos alvos, Alvo I e Lajinha Sul (Figura 3.3). O procedimento de preparação das amostras foi o mesmo descrito anteriormente. As Tabelas 3.6 a 3.11 mostram as características das amostras selecionadas.

ALVO	AMOSTRA/CORPO	MATERIAL/LITOLOGIA	LOCALIZAÇÃO DA COLETA
Antas III	AN-00 / Corpo I	Solo/Encaixante	a 30 metros da zona mineralizada
	AN-01 / Corpo I	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	AN-02 / Corpo I	Solo/Zona Hidrotermalizada	sobre a zona mineralizada
	AN-03 / Corpo I	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	AN-04 / Corpo III	Solo/Zona Hidrotermalizada	sobre a zona mineralizada
	AN-05 / Corpo III	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	AN-06 / Corpo III	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	AN-07 / Corpo III	Saprólito Encaixante	a 30 metros da zona mineralizada
	AN-08 / Corpo III	Rocha/Zona Hidrotermalizada	sobre a zona mineralizada

Tabela 3.6 - Características das amostras analisadas do Alvo Antas III.

ALVO	AMOSTRA/CORPO	MATERIAL/LITOLOGIA	LOCALIZAÇÃO DA COLETA
Antas II	AT-01 / Corpo I	Minério/Zona Hidrotermalizada	dentro da cava
	AT-02 / Corpo I	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	AT-03 / Corpo I	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	AT-04 / Corpo I	Solo/Encaixante	a 30 metros da zona mineralizada

Tabela 3.7 - Características das amostras analisadas do Alvo Antas II.

ALVO	AMOSTRA	MATERIAL/LITOLOGIA	LOCALIZAÇÃO DA COLETA
Lajinha Norte	LN-01	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	LN-02	Solo/Encaixante	próxima a zona mineralizada
	LN-03	Solo/Zona Hidrotermalizada	sobre a zona mineralizada
	LN-04	Minério/Zona Hidrotermalizada	dentro da cava
	LN-05	Solo/Encaixante	a 50 metros da zona mineralizada
	LN-06	Rocha/Zona Mineralizada	dentro da cava

Tabela 3.8 - Características das amostras analisadas do Alvo Lajinha Norte.

ALVO	AMOSTRA	MATERIAL/LITOLOGIA	LOCALIZAÇÃO DA COLETA
Saco III	SC-01	Solo/Zona Hidrotermalizada	sobre a zona hidrotermalizada
	SC-02	Solo/Encaixante	próxima a zona hidrotermalizada
	SC-03	Solo/Encaixante	a 50 metros da zona hidrotermalizada
	SC-04	Rocha/Zona Hidrotermalizada	dentro da trincheira

Tabela 3.9 - Características das amostras analisadas do Alvo Saco III.

ALVO	AMOSTRA	MATERIAL/LITOLOGIA	LOCALIZAÇÃO DA COLETA
Lajinha Sul	LS-01	Rocha/Zona Hidrotermalizada	sobre a zona mineralizada
	LS-02	Solo/Encaixante	a 50 metros da zona mineralizada

Tabela 3.10 - Características das amostras analisadas do Alvo Lajinha Sul.

ALVO	AMOSTRA	MATERIAL/LITOLOGIA	LOCALIZAÇÃO DA COLETA
Alvo I	AL-01	Solo/Zona Hidrotermalizada	sobre a zona mineralizada
	AL-02	Rocha/Zona Hidrotermalizada	dentro da cava
	AL-03	Rocha/Encaixante	a 60 metros da zona mineralizada
	AL-04	Solo/Encaixante	a 50 metros da zona mineralizada

Tabela 3.11 - Características das amostras analisadas do Alvo I.

As novas análises de espectrometria foram realizadas no LARAD, do Instituto de Pesquisa Espacial (INPE), utilizando-se do espectroradiômetro IRIS MK-IV, da Geoscience Environmental Research (GER) (Tabela 3.5).

As curvas espectrais obtidas com os dois instrumentos mostram discrepâncias, devido as diferentes resoluções e relações sinal/ruído de ambos. Essas diferenças não chegam porém a afetar a identificação de feições diagnósticas dos minerais de interesse.

3.4 - Análise das Curvas Espectrais

Para efetuar a interpretação dos dados do sensor multiespectral Geoscan AMSS MK-II da área do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta, onde raramente as rochas hidrotermalizadas estão expostas, é necessário o estabelecimento da relação entre a mineralogia dos solos residuais e das rochas subjacentes. Desta forma, para utilizar imagens multiespectrais na detecção das essas rochas hidrotermalizadas faz-se necessário que pelo menos os minerais indicativos da alteração hidrotermal estejam concentrados anormalmente no solo e superficialmente expostos.

Os processos geradores de solos em climas tropicais e subtropicais acarretam profundas transformações mineralógicas, provocando a mistura de minerais primários e minerais secundários gerados pelo intemperismo. Esses processos de geração de solos ainda é objeto de muitas controvérsias. Tardy (1993) discorre sobre as controvérsias da origem de um dos minerais comumente utilizados como indicador de alteração hidrotermal, a sericita (nome usado para designar micas brancas microcristalinas, incluindo geralmente a muscovita, illita e hidromuscovita). Ele cita autores, para os quais a sericita encontrada nos solos de regiões de clima tropical e subtropical é formada pelo intemperismo dos feldspatos, enquanto outros defendem a idéia de que a sericita é um produto da alteração hidrotermal desses minerais. Com base nesses fatos, a sericita pode se apresentar em concentrações anormalmente altas em solos quando associada à alteração hidrotermal ou à alteração intempérica de rochas ricas em feldspatos ou ainda de rochas ricas em sericita metamórfica de baixo grau. Com base nesses fatos, existe a necessidade de um melhor controle de campo, que possibilite o uso dessa informação na prospecção mineral.

Os óxidos e hidróxidos de ferro também são importante indicadores de depósitos minerais relacionados à alteração hidrotermal. Em climas tropicais esses minerais formam uma mistura complexa denominada limonita, que constitui-se de misturas de proporções variadas dos

minerais goetita e hematita. A limonita junto com material amorfo pode se apresentar em concentrações anormalmente altas quando associada a alguns tipos de depósitos minerais, mais também sob a forma de capas lateríticas ferruginosas, típicas de ambientes tropicais e que não possuem relação com depósitos minerais. Embora existam ainda poucos dados a respeito, têm sido encontradas evidências de material com maior concentração de goetita em *gossans* de jazidas de sulfetos (Fraser *et al.*, 1985, 1986; Raines *et al.*, 1985; Crósta, 1990; Hernandes, 1994). Por outro lado, os processos de laterização ferruginosa, muito comuns em climas tropicais e que produzem capas lateríticas formadas por óxidos de ferro sem qualquer relação com depósitos minerais, possuem uma tendência inversa à essa, produzindo material oxidado com maior quantidade de hematita em relação à goetita.

Raines *et al.* (1985) concluíram que os *gossans* poderiam ser diferenciados das lateritas ferruginosas baseado na maior concentração de goetita dos primeiros. Essa constatação estabeleceria um critério importante para o mapeamento de *gossans* através do sensoriamento remoto. Por outro lado, Fraser *et al.* (1986) colocaram reparos a essa afirmação, mostrando pelo menos um caso em que a goetita não era predominante, como depósito sulfetado de Lady Loretta, Queensland, Austrália. Com base nesse fato, esses autores sugerem a necessidade de uma melhor caracterização espectral de *gossans* sob diferentes condições climáticas, para estabelecer critérios para o uso da informação espectral de minerais com o íon férrico na prospecção mineral.

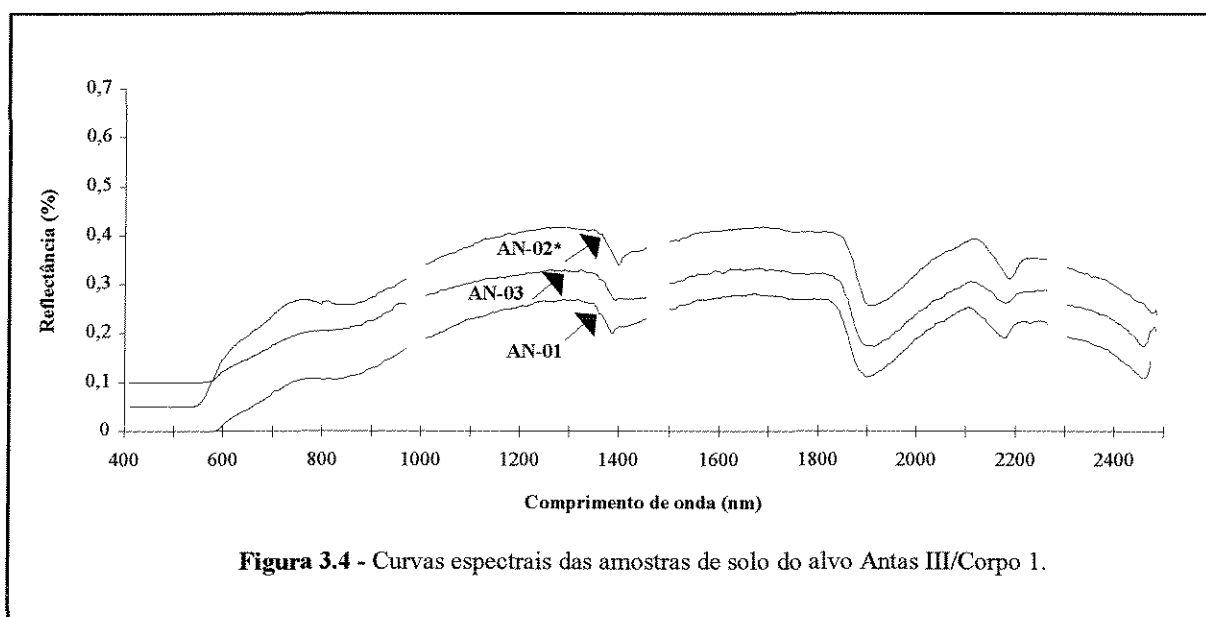
Estudos realizados no Brasil, mostram que os solos residuais das rochas hidrotermalizadas possuem a presença dos minerais indicadores da alteração hidrotermal (Meneses, 1986; Paradela, 1986; Crósta, 1990; Vitorello & Galvão, 1992; Crósta & Rabêlo, 1992, 1993; Crósta, 1993; Ferreira *et al.*, 1993; Meneses *et al.*, 1993; Hernandes, 1994). Também mostram que a laterização de sulfetos associados a mineralizações auríferas produz *gossans* com um maior conteúdo de goetita em relação à hematita (Crósta, 1990; Crósta & Rabêlo, 1992, 1993; Crósta, 1993; Ferreira *et al.*, 1993; Meneses *et al.*, 1993; Hernandes, 1994). Embora os dados disponíveis ainda não sejam suficientes para permitir generalizações, esses parâmetros têm sido utilizados no mapeamento de feições espectrais anômalas associadas à presença de corpos sulfetados em subsuperfície.

Considerando esses aspectos foram feitas análises espectrais dos solos residuais associados às áreas com alteração hidrotermal do depósito da Fazenda Maria Preta. Os objetivos dessas análises foram: (i) investigar a possível relação entre a ocorrência da alteração hidrotermal em subsuperfície e dos solos residuais correspondentes; (ii) o estabelecer as características espectrais desses solos e, (iii) determinar o contraste espectral existente entre esses solos com os solos oriundos das encaixantes.

Para a análise das curvas espectrais é necessário considerar que as principais feições de absorção observadas nessas curvas para grande parte dos materiais geológicos são devidas à presença dos íons Fe^{3+} , OH^- e CO^{+3} . Portanto, a discussão dos espectros a seguir será restrita aos minerais portadores dos mesmos.

Devido à grande silimaridade das curvas espectrais das amostras coletadas depósito aurífero da Fazenda Maria Preta, optou-se em realizar-se uma discussão generalizada de todas conjuntamente.

As Figuras 3.4 a 3.14 apresentam as curvas espectrais das amostras coletadas de rochas hidrotermalizadas, rochas encaixantes e minério (marcada com um asterisco), para os perfis analisados nos diferentes alvos do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta: Antas III/Corpo I, Antas III/Corpo III, Antas II/Corpo I, Lajinha Norte, Saco III, Lajinha Sul e Alvo I.



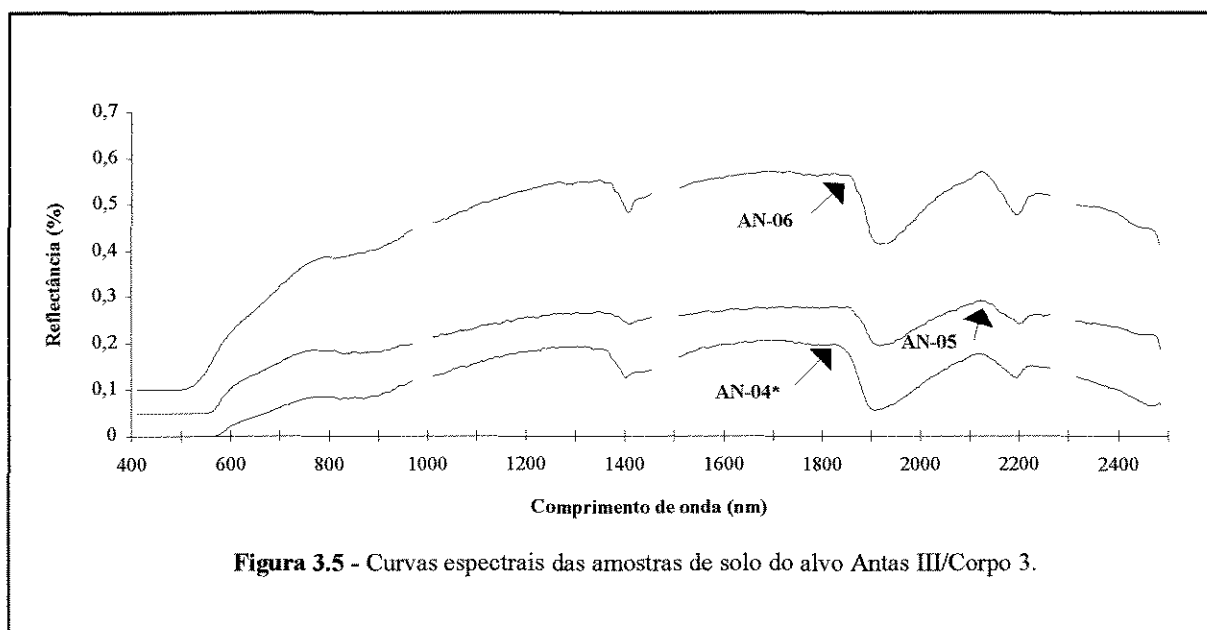


Figura 3.5 - Curvas espectrais das amostras de solo do alvo Antas III/Corpo 3.

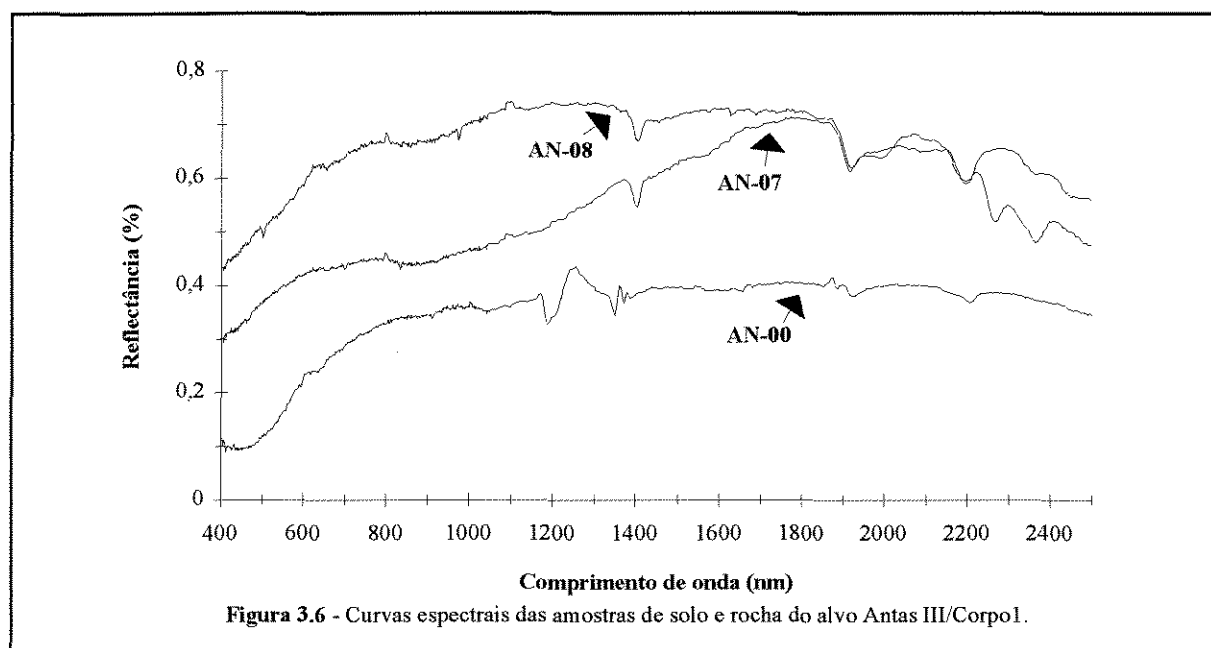
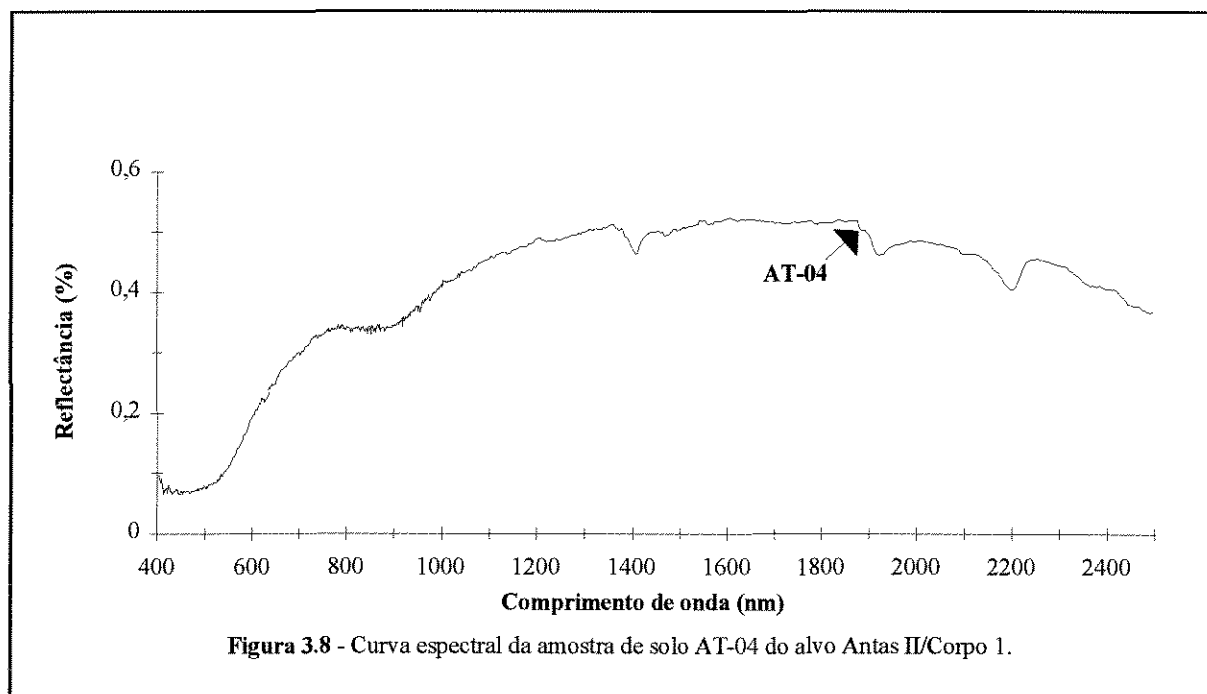
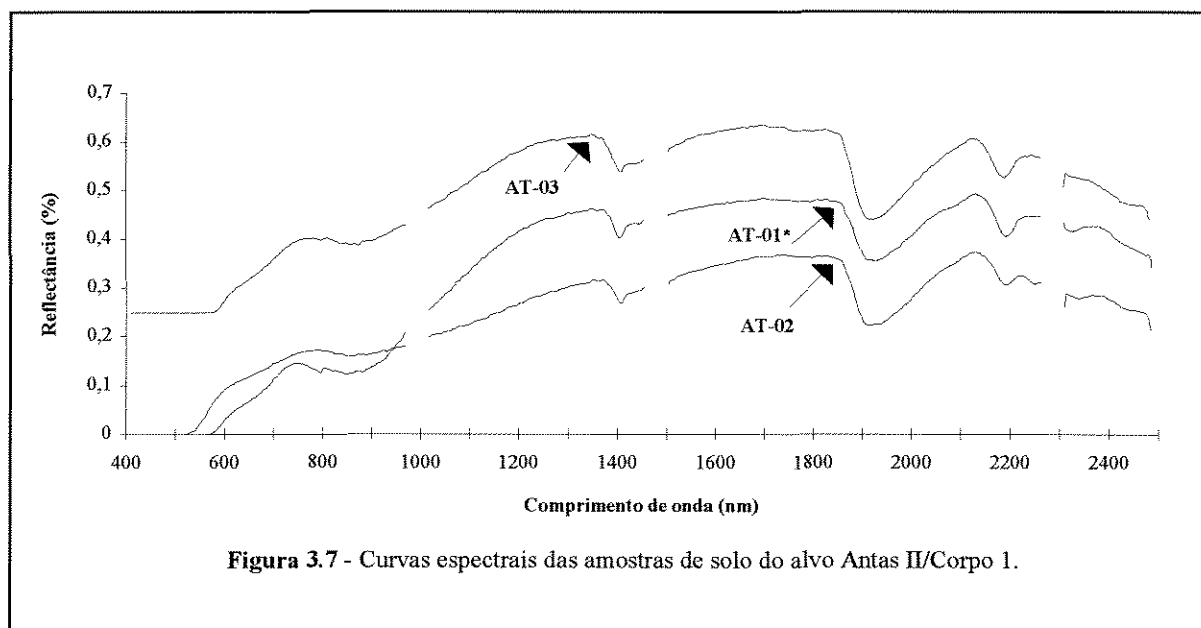
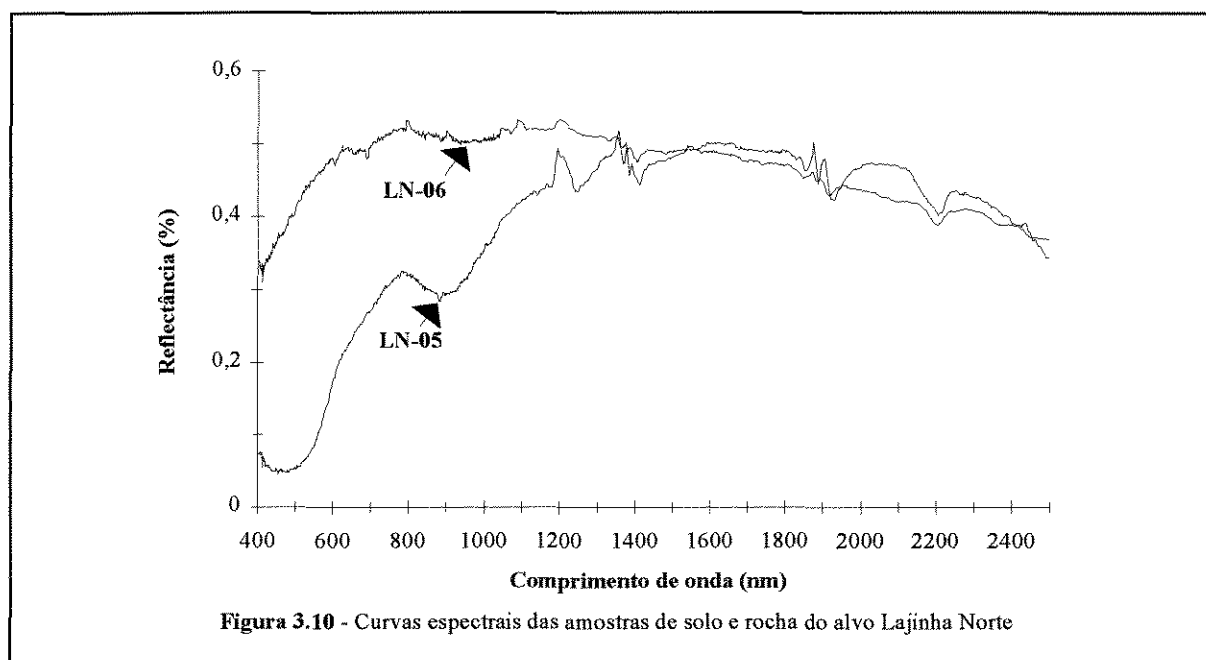
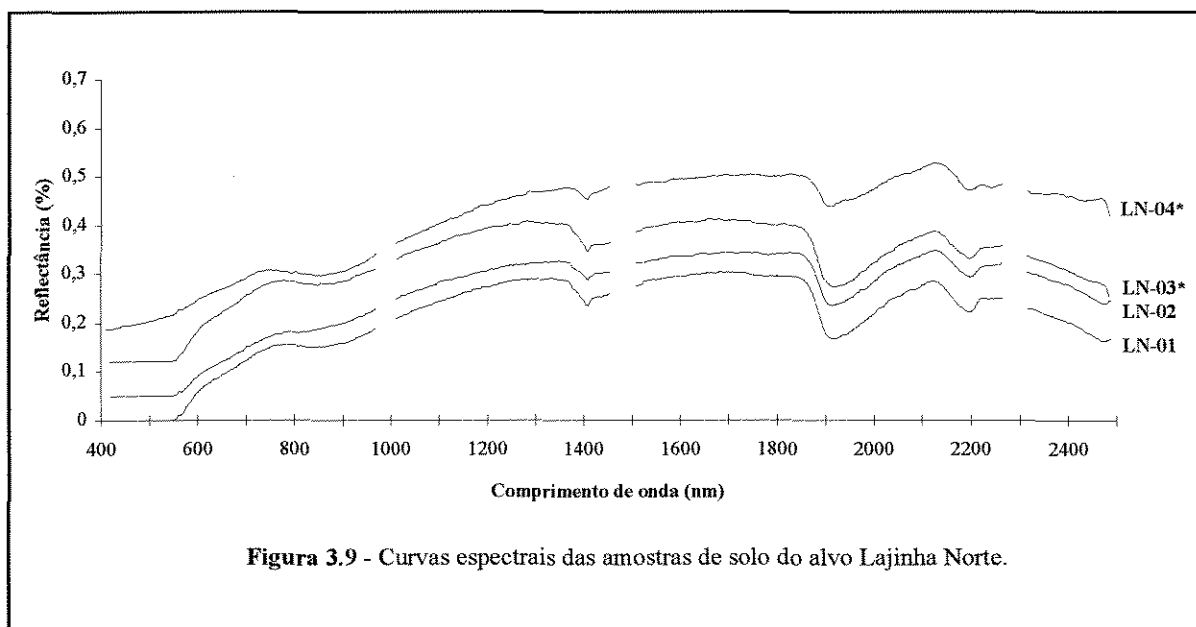
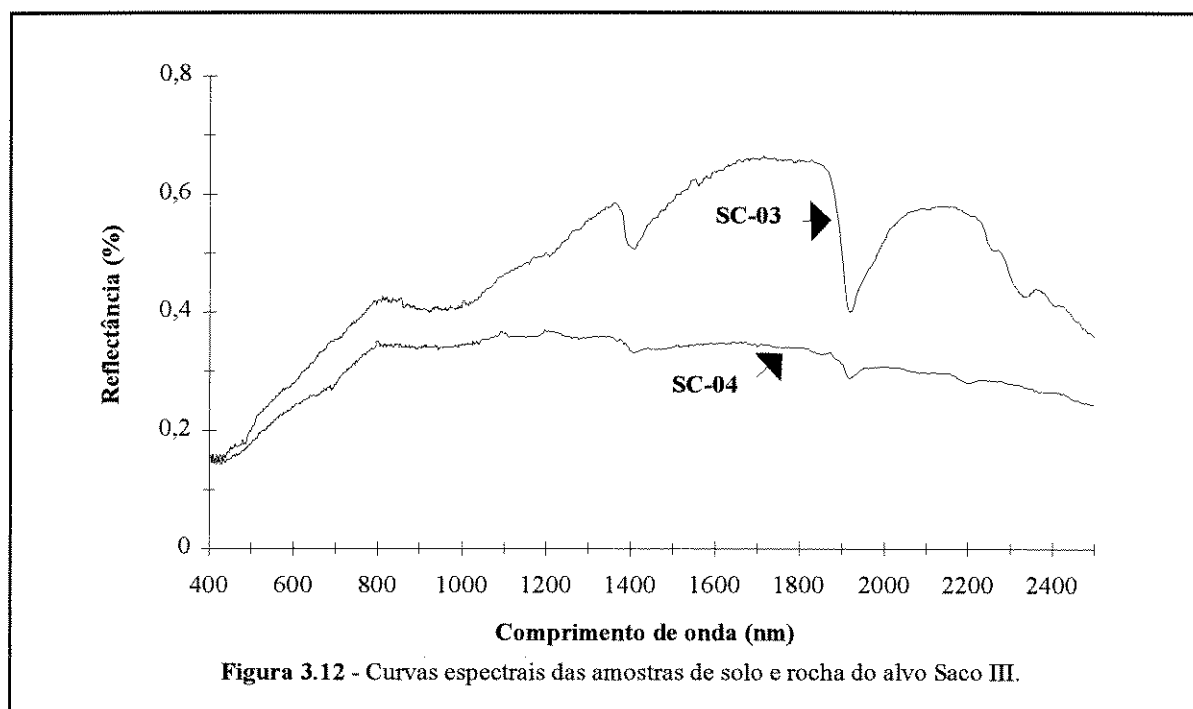
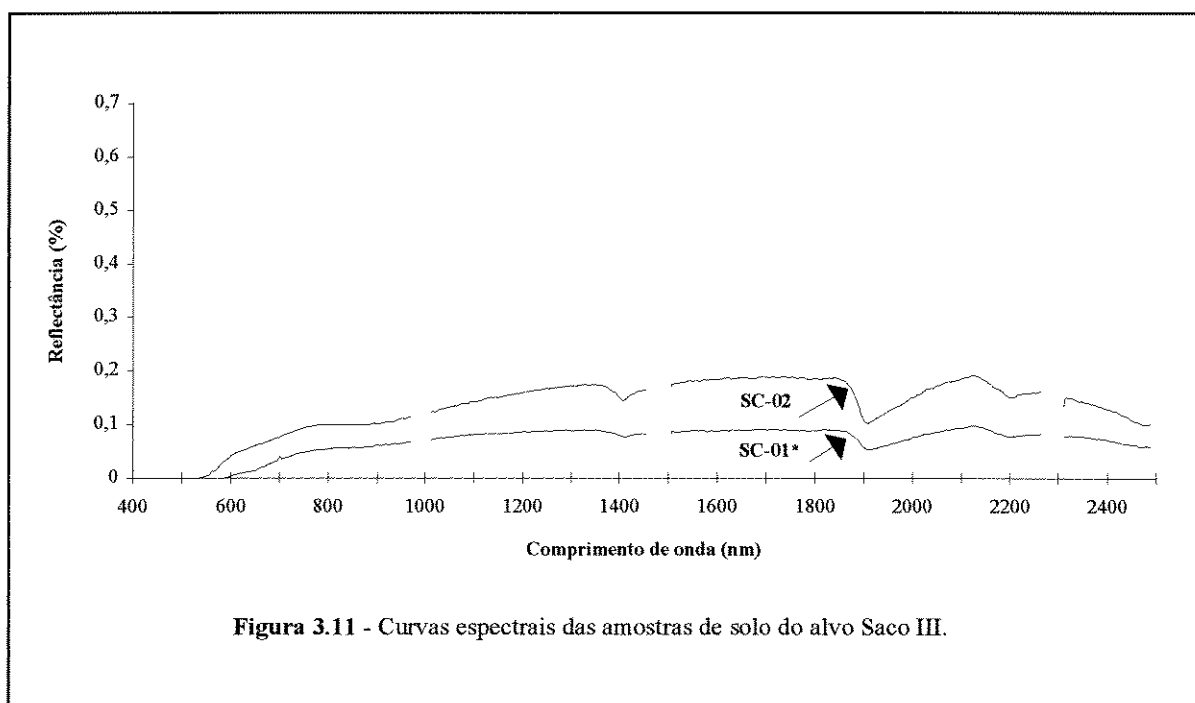
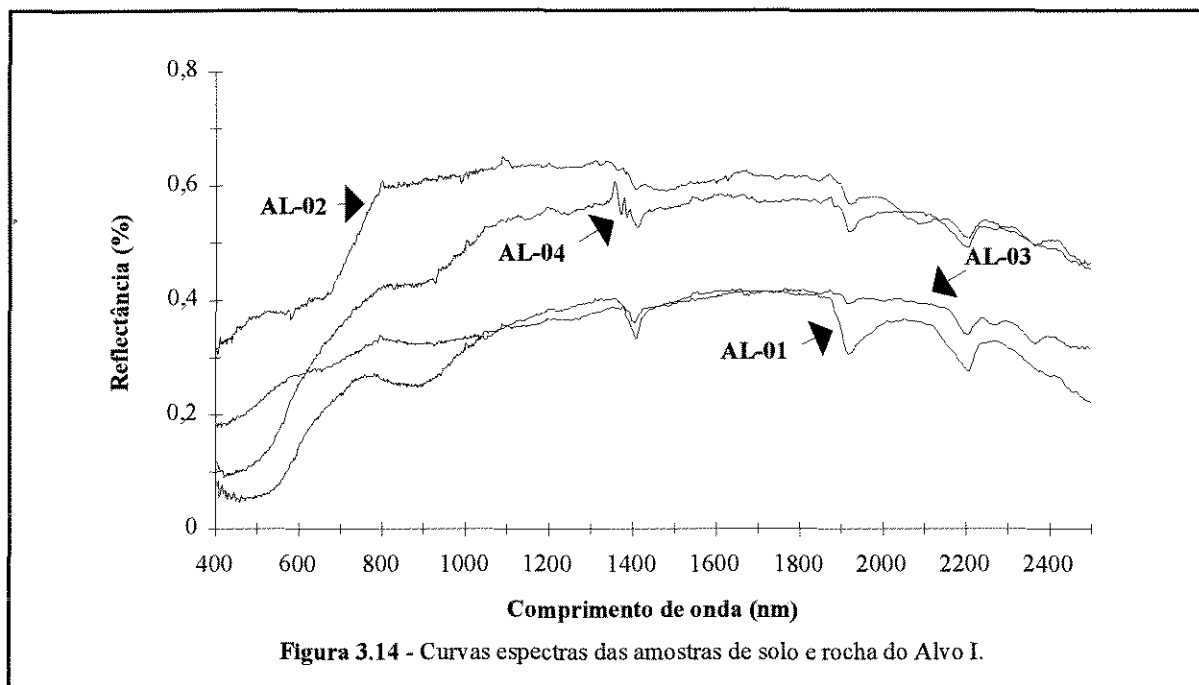
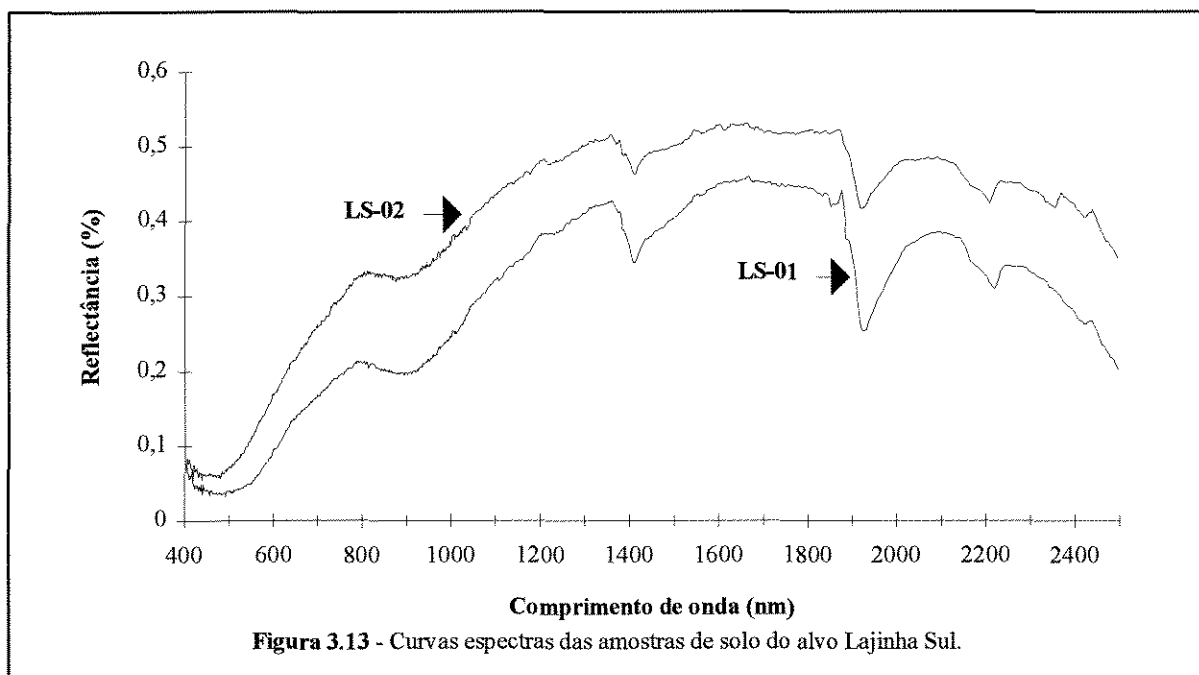


Figura 3.6 - Curvas espectrais das amostras de solo e rocha do alvo Antas III/Corpo I.









Os resultados das análises de espectrometria de reflexão das amostras feitas no instrumento Beckman estão prejudicados no intervalo aproximado 400-550 nm devido a problemas no instrumento. Por esse motivo, as curvas não mostram informações nesse intervalo, com exceção da amostra LN-04. Nos resultados das análises das amostras feitas no instrumento IRIS, observa-se a feição de absorção generalizada da reflectância entre 400 e 600 nm, devido à transferência de carga do íon férrico, com exceção das amostras AN-07, AN-08, LN-06 e AL-02. A tendência geral ascendente em todas as curvas entre 550 e 800 nm é também típica do Fe^{3+} .

A feição de absorção causada pelo campo cristalino, no intervalo 850 a 950 nm, característica dos minerais com o íon férrico (goetita, hematita e limonita), está presente nas curvas espectrais de todas as amostras, com exceção das amostras AN-00 e AL-02. Nas curvas espectrais das amostras AN-07, AN-08, LN-06, SC-01 e SC-02 essa feição apresenta-se mais discreta. Observa-se, também nestas amostras, que existe uma ampla feição de absorção no intervalo aproximado de 800 a 900 nm, caracterizando a ocorrência conjunta de hematita e goetita (o mínimo da hematita é 860 nm e da goetita é entre 920-940 nm) (Buckingham & Sommer, 1983). Essa feição não é, nitidamente, observada nas amostras AN-00 e AL-02, provavelmente devido aos ruídos. A feição secundária causada pela goetita, em torno de 650 nm, é observada, discretamente, na amostra AN-02, AT-01, AT-02, LN-05, AL-01 e AL-04 que foram coletadas na zona hidrotermalizada, com exceção das amostras LN-05 e AL-04..

As feições de absorção típicas de minerais contendo hidroxilas, situadas ao redor de 1400, 1900 e 2200 nm, também são observadas em todas as amostras, com exceção das amostras AN-00, LN-05 e AL-04 onde a feição em torno 1400 nm não é bem nítida. Isso se deve provavelmente devido a problemas no instrumento ou a ruídos. As feições de absorção que ocorrem em 1400 e 1900 nm, devem ser tomadas com certo cuidado na avaliação, pois coincidem com as feições de absorção da água.

As feições em 1400 e 2200 nm são, provavelmente, devidas à presença da illita, caolinita e esmectita, que são confirmadas pelas análises de raios-X. A forte absorção observada em torno 1900 nm das amostras pode ser devido a grande quantidade de argilo-minerais, tais como montmorilonita, haloisita, caolinita e esmectita que, ao contrário das hidromuscovitas e illitas,

apresentam duas camadas de água intrafoliar. Esse fato pode, além de explicar a maior intensidade, justificar a razoável definição espectral observada para estas feições, a qual não ocorreria caso a água excedente fosse apenas água adsorvida ou absorvida (Ferreira Jr. *et al.*, 1993). Porém, nas amostras analisadas no IRIS, as quais foram secas em estufa, a forte absorção em 1900 nm observada em outras amostras não é verificada. Nota-se que a intensidade da reflectância ficou mais elevada, indicando maior quantidade de água nas primeiras amostras. A dupla feição de absorção da caolinita, que ocorre em 1400 e 2200 nm, é observada somente nas amostras LN-05, LN-06, LS-01, LS-02 e AL-01. Nas outras amostras não é observada, possivelmente devido à quantidade de illita nessas amostras ser muito maior do que de caolinita.

A feição de absorção em torno de 2200 nm apresenta uma pequena variação em torno de 2180 a 2210 nm, independente da localização das amostras. Essa variação parece com a feição de absorção simples da illita, que ocorre entre 2190 e 2210 nm (Clark *et al.*, 1993), dependendo do índice de cristalinidade da cristalização específica da illita. Em torno de 2340 nm, as amostras de rochas AN-07, AN-08, AL-02 e AL-03 mostram uma feição de absorção, possivelmente relatando à presença de carbonatos. Observa-se também, nas amostras SC-03 e LS-02 uma feição de absorção possivelmente relatando à presença da clorita. Esta feição não é observada nas análises realizadas no Beckman, pois nesta região as análises apresentam um forte ruído.

Em todas análises espectrais realizadas no Beckman, em torno de 1000, 1480 e 2300 nm observa-se um trecho em branco, que corresponde a trechos em que o instrumento apresentou forte ruído e que foram retiradas do gráfico.

3.5 - Discussão

Os resultados das análises de espectrometria de reflexão e de difração de raios-X foi possibilitam alguns comentários a respeito do comportamento espectral de rochas e de solos oriundos de zonas hidrotermalizadas e de suas encaixantes:

- observando os resultados das análises de espectrometria de reflexão, nota-se a existência de feições secundárias da goetita, em torno de 650 nm, ocorrendo principalmente nas amostras

coletadas nas zonas hidrotermalizadas. Nota-se também que nestas amostras, onde existe a predominância da goetita, a feição de absorção fica mais proeminente no intervalo entre 850-900 nm. Essas características são confirmadas com os resultados de difratometria de raios-X. Esses resultados corroboram os estudos de Raines *et al.* (1985), Crósta (1993) e Hernandez (1994), mostrando que a goetita predomina sobre a hematita nos *gossans* originados de corpos sulfetados em zonas hidrotermalizadas;

- observa-se também uma grande similaridade no comportamento espectral de todas as amostras no infravermelho próximo (NIR) e nas ondas curtas (SWIR). A impossibilidade de diferenciação entre as rochas hidrotermalizadas e respectivas encaixantes pode indicar que: (i) que a alteração hidrotermal é muito mais ampla espacialmente que se imagina ou, (ii) que a feição de absorção em torno de 2200 nm em solos residuais está relacionada com argilo-minerais intempéricos, também portadores da molécula O-H, os quais não têm relação direta com os produtos de alteração hidrotermal das rochas subjacentes;

- de acordo com as análises de espectrometria, nota-se que os processos de intemperismo da região originaram solos residuais com composição mineralógica muito similares, independente da rocha fonte. Desta forma, o comportamento espectral desses solos também é muito semelhante;

- de acordo com os resultados das análises de espectrometria de reflexão e de raios-X, observa-se que os processos intempéricos originaram minerais secundários que possuem o mesmo comportamento espectral dos minerais hidrotermais. Portanto, esse fato dificulta ou até mesmo impossibilita a detecção de anomalias de minerais hidrotermais através das técnicas utilizadas nos processamentos digitais das imagens Geoscan;

- em algumas análises de espectrometria realizadas em amostras de rochas, observa-se a presença de carbonato, que é indicativo da presença da alteração hidrotermal. Porém, as características espectrais desse mineral não devem ser utilizadas nos processamentos das imagens do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta na detecção das zonas hidrotermalizadas, pois esse mineral é facilmente lixiviado durante o intemperismo;

- as análises de espectrometria de reflexão, realizadas no DRI, e de difratometria de raios-X não apresentaram resultados compatíveis. A difração, em geral indica a presença da caolinita; entretanto, este mineral não é documentados nas leituras espectralradiométricas;
- a comparação entre os resultados obtidos no DRI e no LARAD é difícil, pois as amostras são diferentes;
- a difratometria de raios-X não auxiliou na interpretação, pois a quantidade relativa dos minerais identificados era muito similar em todas as amostras.

CAPÍTULO 4

4 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

4.1- Introdução

O processamento digital de imagens compreende uma grande variedade de técnicas que auxiliam o usuário na extração de informações contidas em imagens digitais. A grande quantidade de dados gerados pelos sistemas imageadores de sensoriamento remoto, cada vez com maior número de bandas, torna mais complexa e subjetiva a sua interpretação e requer a utilização de processamento digital de imagens para eliminar parte da subjetividade inerente ao processo de interpretação.

As técnicas de processamento digital de imagens mais utilizadas para realçar as feições espectrais têm obtido grande sucesso na exploração mineral, principalmente na identificação de minerais de alteração hidrotermal associados à mineralizações auríferas (Ashley & Abrams, 1980; Podwysocki *et al.*, 1983; Elvidge & Lyon, 1984; Fraser *et al.*, 1986; Huckerby *et al.*, 1986; Magee *et al.*, 1986; Kaufmann, 1988; Lamb & Pendock, 1989; Moore & Guo, 1990; Crósta & Rabêlo, 1992, 1993; Ferreira Jr. *et al.*, 1992; Meneses *et al.*, 1993; Agar, 1994; Hernandez, 1994). Os sensores com alta resolução espectral possuem bandas posicionadas em regiões do espectro eletromagnético onde minerais apresentam feições diagnósticas, permitindo tal identificação. Entretanto, em regiões de clima tropical e subtropical, como no Brasil, onde o intemperismo das rochas é intenso e a cobertura vegetal constante, este tipo de aplicação ainda é limitado. Essa limitação é agravada pela atividade antrópica, principalmente a agricultura, mascarando feições de interesse. Nestes casos, a aplicação de técnicas apropriadas de processamento digital de imagens podem ajudar a remover obstáculos e realçar informações geológicas contidas nas imagens. Quando comparada aos métodos tradicionais de exploração mineral, o uso das técnicas de processamento digital têm resultado em redução de custos e tempo.

Neste estudo foram aplicadas as técnicas de processamento digital nas imagens Geoscan AMSS MK-II, com intuito de realçar as feições espectrais dos minerais diagnósticos da alteração

hidrotermal de depósito aurífero da Fazenda Maria Preta. Neste contexto, foram selecionadas somente as técnicas de subtração de bandas, razão de bandas e FPCS.

Inicialmente realizam-se pré-processamentos, para corrigir erros sistemáticos e de calibração radiométrica da imagem. Posteriormente, realiza-se o processamento propriamente dito, para análise e extração de informação.

4.2 - Pré-Processamento

As imagens geradas por sensores estão sujeitas uma série de imperfeições, causadas por problemas de calibração dos detectores, mal funcionamento do sensor, problemas com a recepção e registro da informação, efeitos atmosféricos e distorções causados por oscilações da plataforma (Castleman, 1978; Siegal & Gillespie, 1980; Sabins, 1987). Colwell (1984), categoriza essas imperfeições em dois grupos. Interno- são aquelas criadas pelo próprio sensor e externo - devido as perturbações da plataforma. A Tabela 4.1 sintetiza as fontes mais comuns geradoras das imperfeições internas e externas e os efeitos geométricos e radiométricos sobre o imageamento (adaptada de Colwell, 1984, *apud* Hunt 1994). As correções geométricas, atmosféricas e radiométricas são utilizadas para retificar as imperfeições ocorridas durante a geração das imagens.

4.2.1 - Correção Geométrica

Para que as imagens de sensoriamento remoto tenham precisão cartográfica, faz-se necessário que estas sejam registradas a algum sistema de coordenadas. Essa transformação faz com que as imagens assumam propriedades de escala e de projeção espacial. Esse processo é denominado de Correção Geométrica.

A correção geométrica das imagens Geoscan AMSS MK-II gera imagens com precisão cartográfica. A precisão cartográfica é importante na exploração mineral em áreas de dimensões reduzidas.

CORREÇÃO RADIOMÉTRICA		
Tipo de Erro	Fonte do Erro	Efeito no Imageamento
Interno:	Resposta do detector:	Introdução de ruídos
Externo:	Fontes de erros de calibração:	Diferentes ganhos e perdas
Atenuação:	Espalhamento atmosférico e reflectância:	Modificação do sentido da cena
CORREÇÃO GEOMÉTRICA		
Tipo de Erro	Fonte do Erro	Efeito no Imageamento
Interno:	Velocidade do espelho imageador:	Erro geométrico no imageamento cruzado
Externo:	Amostragem do detector:	
	Distorção Panorâmica:	
	Deslocamento de linha (<i>Scan Skew</i>):	
	Velocidade da plataforma:	Distorção de escala ao longo do voo
	Perspectiva geométrica (magnitude da inclinação, direção):	Diferenças na reflectância Distorção ao longo e transversal ao voo Distorção na escala da imagem Sem alinhamento para mapas base
	Altitude (roll, pitch, yaw):	
	Altitude:	
	Projeção descrita:	

Tabela 4.1 - Síntese das fontes mais comuns geradoras das imperfeições internas e externas nos imageamentos por sensores aeroportados.

O método utilizado para a correção geométrica das imagens Geoscan AMSS MK-II baseia-se em pontos de controle. O método consiste em 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 (Crósta, 1992).

A base do método consiste em estabelecer as diferenças de posicionamento de alguns pontos na imagem e no mapa. Com base nessas diferenças, as distorções presentes na imagem podem ser estimadas, e aplicada uma transformação espacial definida. A precisão do método está relacionada à precisão no posicionamento dos GCPs e na disponibilidade de um mapa confiável em uma escala compatível com a resolução espacial das imagens.

A correção geométrica das imagens Geoscan AMSS MK-II consistiu em determinar a relação entre o sistema de coordenadas UTM da base do IBGE em escala 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 das imagens

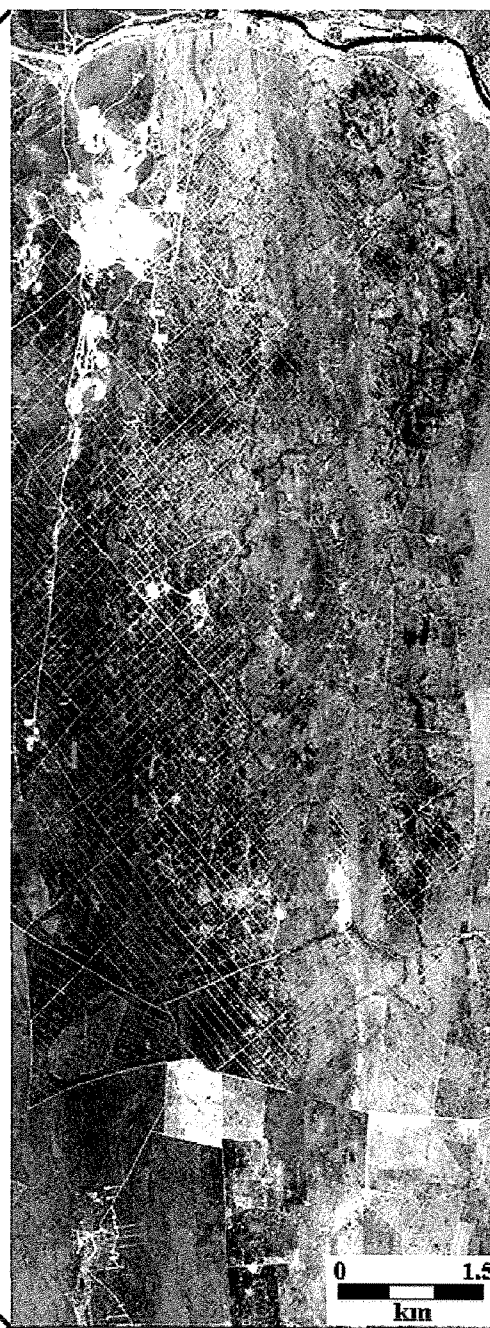
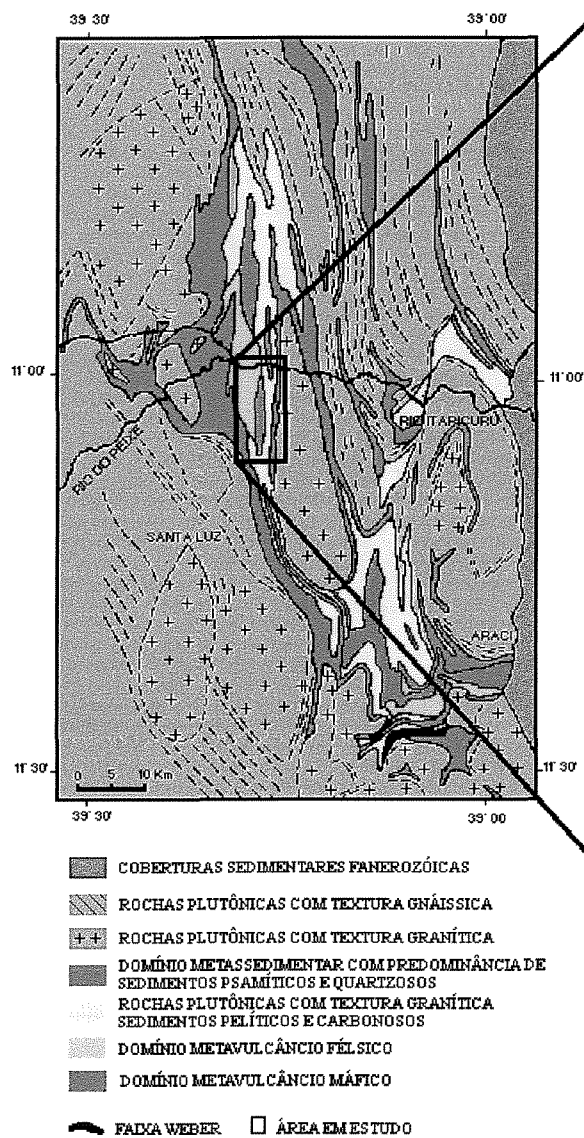
Geoscan AMSS MK-II, o erro associado a cada ponto de controle foi muito elevado. O erro acumulado também foi muito elevado, superior a 400 metros.

Alternativamente utilizou-se GPS (*Global Positioning System*) para estabelecer as coordenadas de pontos no terreno identificáveis na imagem. Desta forma, pôde-se quantificar as diferenças de posicionamento dos pontos da imagem e das coordenadas dos mesmos pontos obtidas por triangulação dos satélites do sistema de posicionamento global. A precisão do método está relacionada a precisão do instrumento utilizado e da disponibilidade de satélites para que as coordenadas obtidas tenham um valor compatível e próximo das imagens Geoscan AMSS MK-II. Contudo, essa alternativa também não apresentou resultados satisfatórios, pois o GPS utilizado era de pouca precisão (erro de 50 a 150 metros), acarretando um erro acumulado acima de 500 metros.

Em função das dificuldades encontradas para realizar a correção geométrica das imagens Geoscan AMSS MK-II, optou-se então por fazer a localização do posicionamento das imagens no mapa geológico do *greenstone belt* do Rio Itapicuru (Figura 4.1). Essa localização foi feita através de pontos identificáveis nas imagens e no mapa em função do conhecimento da área.

4.2.2 - Correção Atmosférica

As imagens geradas pelos sensores ópticos são afetadas pelos gases e partículas da atmosfera, causando absorção ou espalhamento da radiação. Isto acarreta subtração e/ou adição nos valores originais do espectro. Mather (1987) mostra que esses efeitos atmosféricos aumentam inversamente ao comprimento de onda. As bandas do espectro visível sofrem influência maior destes efeitos comparativamente às bandas do infravermelho. Desta forma, principalmente nas imagens geradas por sensores orbitais (mais sujeitas à interferência atmosférica), deve-se realizar a remoção desse efeito, para que as imagens representem realmente as características espectrais dos objetos imageados.



RGB 421

MAPA GEOLÓGICO GREENSTONE BELT RIO ITAPICURU
(Modificado de Kistler, 1979)

Figura 4.1 - Mostra o mapa geológico do *greenstone belt* Rio Itapicuru com a localização da imagem Geoscan AMSS MK-II na área em estudo.

No caso do sensor Geoscan AMSS MK-II, todos os dados são automaticamente processados após a aquisição para fazer o uso otimizado do intervalo dinâmico disponível (0-255 em termos de níveis de cinza). Para isso, antes de fazer o imageamento o avião realiza um perfil prévio onde são estabelecidos "fatores de ganho" individuais para cada banda. Esses fatores distintos são então aplicados à cada uma das 24 bandas e o imageamento correto é realizado. Por esse motivo, não é necessária a correção atmosférica, como no Landsat/TM.

4.2.3 - Ruídos

As imagens digitais geradas por sensores remotos possuem frequentemente imperfeições que são inerentes ao processo de imageamento e transmissão (ruídos). Esses ruídos não só representam um fator visualmente desagradável em uma imagem, mas também podem afetar algumas técnicas de processamento de imagens, sensíveis à esse tipo de imperfeição (Crósta, 1992). Esses ruídos são normalmente valores anômalos, muito mais claros ou escuros que o *background* local. O método mais comum de eliminá-los é usando uma filtragem de frequência.

Filtragem de frequência é a técnica que permite realçar ou suavizar variações no gradiente de níveis de cinza. São três os tipos básicos de filtros de convolução utilizados em sensoriamento remoto: filtros passa-baixas, passa-altas e direcionais.

Neste estudo utilizou-se filtros de convolução passa-baixas para suavizar os ruídos das imagens Geoscan AMSS MK-II. O filtro utilizado foi o de média.

4.3 - Técnicas de Processamento Digital de Imagens

O processamento digital de imagens de sensoriamento remoto reúne o conjunto de técnicas para identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse para determinado fim, à partir de uma enorme quantidade de dados que compõem essas imagens (Drury, 1987; Mather, 1987; Sabins, 1987; Crósta, 1992; Lillesand & Kiefer, 1994).

Neste estudo com as imagens Geoscan AMSS MK-II, foram utilizadas técnicas de processamento digital para discriminação de minerais de interesse a exploração do ouro. Isto é possível, pois o sensor Geoscan AMSS MK-II possui uma resolução espectral relativamente alta possibilitando a percepção de diferenças espectrais sutis entre minerais, rochas e solos. Esse sensor foi desenvolvido de forma a ter bandas situadas em intervalos do espectro eletromagnético que possibilitam a diferenciação de cada mineral de interesse, como mostra a Figura 4.2.

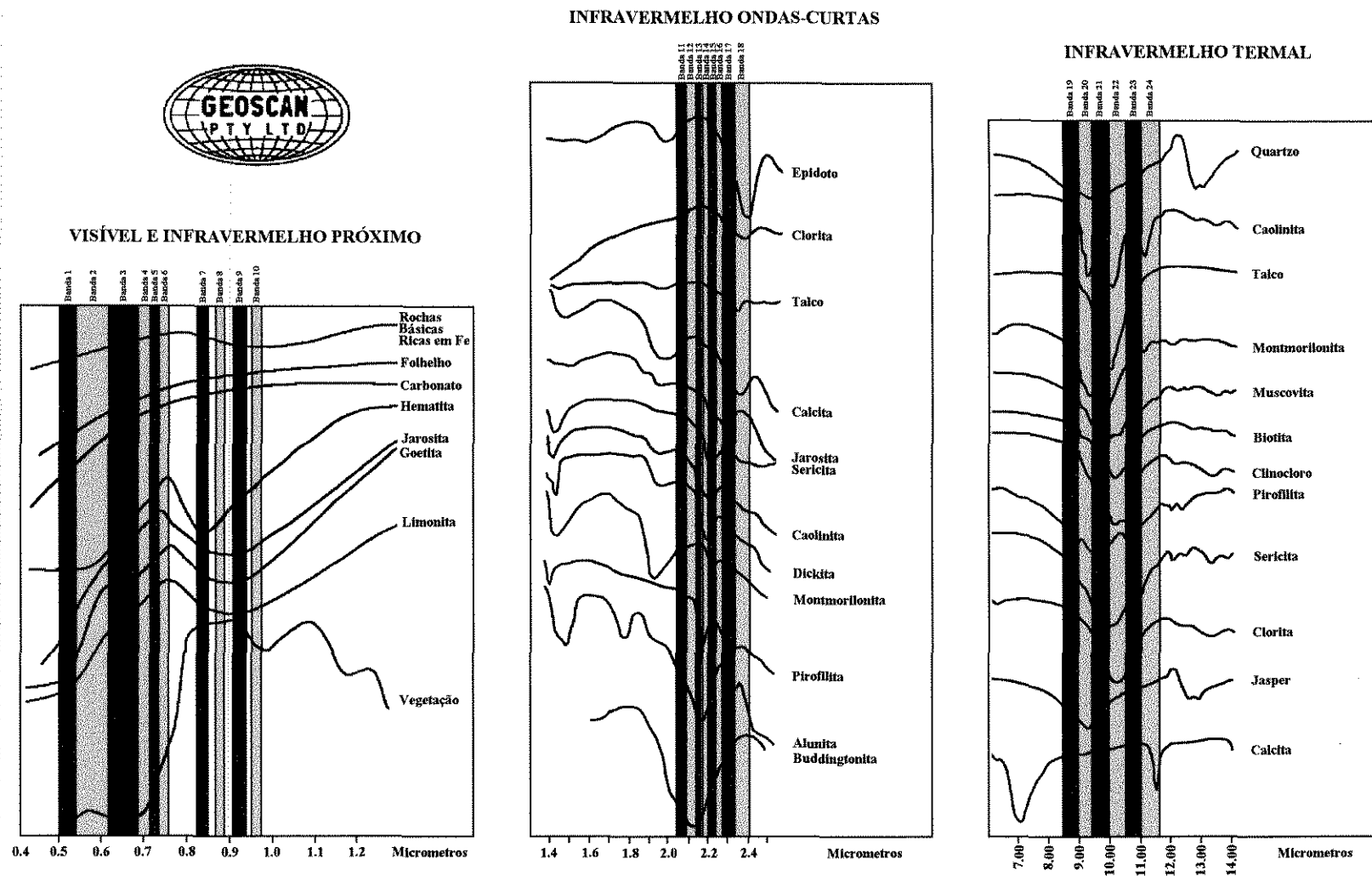
O aumento da resolução espectral das imagens digitais, isto é, o aumento de número de bandas e a redução da largura das bandas, leva a um melhor prognóstico no mapeamento de minerais. Isto é confirmado na Austrália, onde os dados de sensores aeroportados, tais como Geoscan, GER, AIS e MEIS estão conseguindo obter sucesso na discriminação de vários filossilicatos no SWIR (Huntington & Green, 1988) e da goetita e hematita no VNIR (Fraser *et al.*, 1985). A Figura 4.3 mostra as posições centrais das 18 bandas no VNIR e no SWIR do Geoscan AMSS MK-II, superimpostas no espectro da caolinita. Essas bandas podem também ser comparadas com a baixa resolução espectral do Landsat/TM.

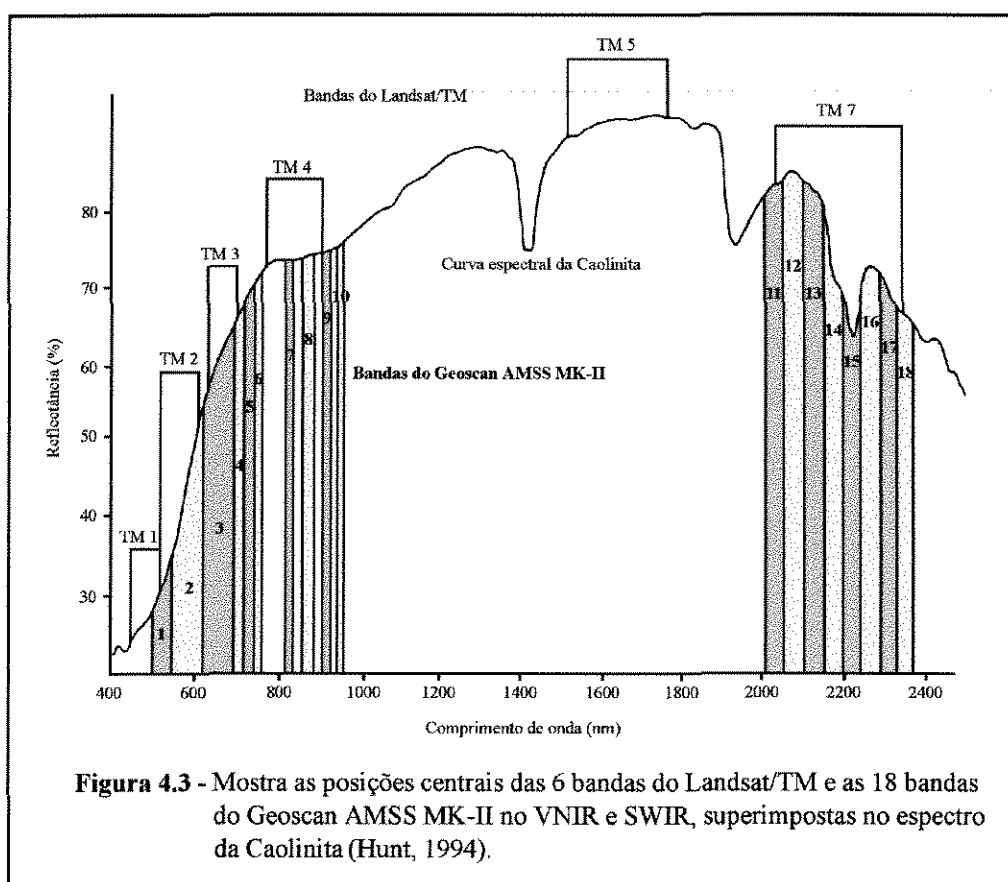
As feições de absorção diagnosticadas nas curvas espectrais das amostras de solo da região do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta mostram duas assembléias mineralógicas passíveis de serem discriminadas nas imagens Geoscan AMSS MK-II, através das técnicas de processamento digital propostas. As assembléias passíveis de serem diagnósticas nestas imagens são os óxidos e hidróxidos de ferro, nas bandas do VNIR e filossilicatos, nas bandas do SWIR.

As técnicas de processamento digital aplicadas às imagens Geoscan AMSS MK-II estão descritas sucintamente a seguir.

4.3.1 - Aumento de Contraste

As imagens geradas pelos sensores ópticos, em geral, não ocupam a totalidade do intervalo da resolução radiométrica (256 níveis de cinza), que variam de 0 (preto) a 255 (branco). Isto ocorre pois raramente encontra-se valores extremos de radiação dentro de uma área, implicando que as imagens em geral possuem pouco contraste. A aplicação de técnicas de





aumento de contraste possibilita que imagens com pouco contraste sejam realçadas, isto é, os histogramas comprimidos sejam espalhados pelo intervalo de 256 tons de cinza. Esta operação faz com que o olho humano perceba mais claramente as diferenças de tonalidades de cinza nas imagens digitais.

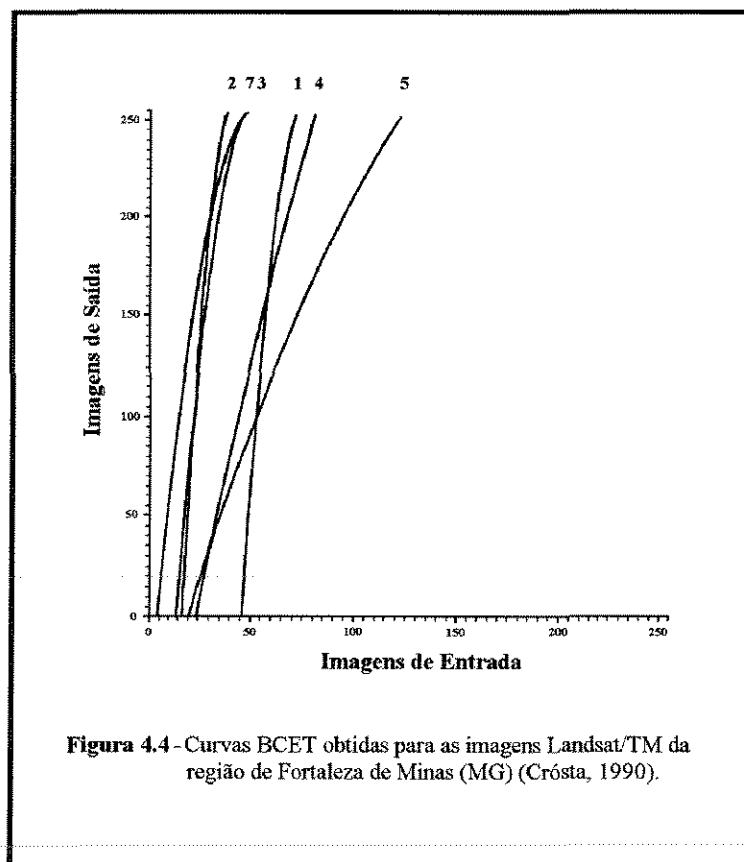
Existem diversos tipos de aumento de contraste que são aplicados em função da forma do histograma e do objetivo desejado. Os aumentos de contraste utilizados neste trabalho foram: aumento de contraste linear e aumento de contraste balanceado (BCET) (Guo, 1991).

O aumento de contraste linear é a forma mais simples de realçar as informações em uma imagem. Ele preserva o formato original do histograma, porém muda o valor médio e o espalhamento. Deve-se ter cuidado quando for aplicado, principalmente nos limites a serem estabelecidos, pois pode-se perder informações importantes (Drury, 1987; Mather, 1987; Sabins, 1987; Crósta, 1992; Lillesand & Kiefer, 1994). Esse tipo de aumento foi aplicado em todas as

imagens processadas, com o objetivo de realçar e consequentemente melhorar a visualização das informações contidas nos produtos finais, sejam apresentados em níveis de cinza ou na forma de composições coloridas.

O aumento de contraste Balanceado (BCET), desenvolvido por Guo (1991), consiste basicamente na obtenção de uma curva de transferência de contraste que se aproxime de uma reta. Matematicamente, é implementada por uma função parabólica ou cúbica. Essa técnica permite o controle dos valores de DN (*Digital Number*) mínimos e máximos, da média e dos valores mínimos e máximos de corte. Além de preservar o formato original do histograma, evita perda de informação (Guo, 1991). A Figura 4.4 mostra as curvas de transferência produzidas com aplicação da técnica BCET nas imagens Landsat/TM de Fortaleza de Minas (MG) realizadas por Crósta (1990).

Essa técnica de aumento de contraste foi aplicada separadamente em cada banda antes que estas fossem utilizadas na subtração de bandas.



4.3.2 - Composição Colorida

A informação espectral contida em três bandas diferentes pode ser sintetizada em uma única imagem colorida, usando a técnica de composição colorida. Além de utilizar informações de três bandas, essa técnica é extremamente útil, uma vez que o sistema visual humano tem maior facilidade para discriminar as variações nas tonalidades de cores (Crósta, 1992).

O sistema de espaço de cores RGB é o mais amplamente utilizado em composições coloridas, apesar de existirem outros na literatura (Shih, 1995). O método consiste em utilizar os valores de DN de três bandas de uma mesma imagem numa combinação das cores vermelho, verde e azul. Esta combinação de cores primárias gera em torno de 16 milhões de cores derivadas, auxiliando a interpretação da imagem.

Neste estudo, foram selecionados alguns tripletos para extrair informações de interesse, de acordo com os tripletos selecionados pela Geoscan (1992):

- B4, B2, B1 - cor verdadeira (Figura 4.5);
- B17, B8, B2 - discrimina a vegetação da área em verde, sendo que o verde mais intenso representa a vegetação mais sadia (Figura 4.6);
- B20, B14, B6 - esse tripleto foi selecionado para discriminar as litologias da região, onde a banda B20 realça a presença da sílica, a B14 da hidroxila e a B6 do íon férrico. Desta forma, essa combinação discriminou algumas litologias da área, de acordo com o mapa geológico. Os metassedimentos pelíticos em amarelo alaranjado, devido predomínio de quartzo e filossilicatos. Os metagabros e metadioritos em vermelho claro, em decorrência do predomínio de óxidos e hidróxidos de ferro e quartzo. Os metassedimentos tufáceos em azul intenso, em decorrência do predomínio de óxidos e hidróxidos de ferro e os metandesitos em azul menos intenso, devido ao predomínio de óxidos e hidróxidos de ferro e filossilicatos (Figura 4.7);

- B20, B21, B22 - utilizado para discriminar a distribuição da sílica na área. Essa combinação realça a presença da sílica em tonalidades branca e cian (Figura 4.8). A imagem apresenta grande quantidade de ruídos, em tonalidades magenta claro e cian esverdeado. Apesar desses ruídos, observa-se grande parte da área a presença da sílica. Isto é confirmado em campo, pois área está repleta de seixos de quartzo no solo residual (Foto 4.1). Esses fortes ruídos estão presentes em todas as bandas do infravermelho termal e foram gerados durante o imageamento da área estuda.



Foto 4.1 - Vista da ocorrência de quartzo no solo residual

A composição colorida tornou-se uma técnica usual dentro do processamento digital de imagens, sendo útil não apenas nas composições de bandas originais, mas também nas operações aritméticas entre bandas, componentes principais, imagens filtradas, etc. Desta forma, a maioria dos produtos finais deste trabalho estão representados em combinação colorida (RGB).



**Figura 4.5 - Composição colorida em
RGB (4 2 1)**



Figura 4.6 - Composição colorida em
RGB (17 8 2)



**Figura 4.7 - Composição colorida em
RGB (20 14 6)**



Figura 4.8 - Composição colorida em
RGB (20 21 22)

4.3.3 - Operações Aritméticas

As operações aritméticas são regras matemáticas aplicadas em imagens multiespectrais e/ou multitemporais, que permitem duas ou mais imagens sejam combinadas em uma única imagem. Essa técnica é bastante utilizada na determinação dos chamados índices de biomassa e na identificação de alguns tipos de minerais. Essas operações possibilitam o realce espectral do material desejado, reduzindo a dimensionalidade de informações dos dados originais, porém com perda de informação. As operações aritméticas mais utilizadas em exploração mineral com imagem multi e hiperespectrais são a subtração e a razão de bandas.

Neste estudo, foram aplicadas as técnicas de subtração e a razão de bandas, com o objetivo realçar áreas anômalas de minerais associados as zonas de alteração hidrotermal.

Previamente à subtração, todas as bandas foram submetidas a um aumento de contraste balanceado (BCET). Esse procedimento foi realizado para que todas as bandas utilizadas ficassem normalizadas, isto é, tivessem a mesma média e desvio padrão. Com isso, nenhuma banda irá contribuir com maior peso que a outra no resultado da subtração (Crósta, 1990).

As bandas escolhidas para a realização das operações aritméticas foram selecionadas de acordo com o comportamento espectral dos minerais de interesse. A seleção aqui adotada espelha-se nos trabalhos de Agar (1994), realizado na mina de Jillawarra (Austrália), e de Hernandes (1994), realizado na mina de Riacho dos Machados (Minas Gerais), com as imagens Geoscan AMSS MK-II. Os conjuntos de bandas selecionados foram:

♦ (B2,B1), (B3, B2) e (B6, B8) em RGB: para realce dos óxidos e hidróxidos de ferro. Nesse triplete pressupõe-se que a hematita, a limonita e/ou jarosita e a goetita exibam-se em tons cian, branco e magenta, respectivamente. Isto ocorre porque as diferenças e razões entre todos os conjuntos de bandas são altas para os minerais citados acima, com exceção dos conjuntos B2B1 e B3B2 que são baixas para hematita e goetita, respectivamente;

♦ (B6, B7), (B6, B8) e (B6, B9) em RGB: para realce dos óxidos e hidróxidos de ferro. Nesse triplete pressupõe que a presença conjunta da hematita, limonita e/ou jarosita e goetita exibam-se em branco. Isto ocorre porque as diferenças e razões entre os conjuntos de bandas são altas para os minerais citados acima;

♦ (B3, B2), (B6, B8) e (B11, B14) em RGB: para realce dos óxidos e hidróxidos de ferro e dos minerais contendo hidroxila. Nesse triplete pressupõe que os óxidos e hidróxidos de ferro e minerais contendo hidroxila (sericita (illita), caolinita, etc) exibam-se em amarelo e branco, respectivamente. Neste caso, as diferenças e razões entre todos os conjuntos de bandas são altas para todos minerais citados acima, com exceção do conjunto B11B14, que é baixa para os óxidos e hidróxidos de ferro;

♦ (B3, B2), (B6, B8) e (B22,B20) em RGB: para realce dos óxidos e hidróxidos de ferro e da sílica. Nesse triplete pressupõe que os óxidos e hidróxidos de ferro exibam-se em branco e amarelo e quartzo em branco. Nesse caso, as diferenças e as razões entre todos os conjuntos de bandas são altas para todos os minerais citados acima;

♦ (B6, B8), (B11, B14) e (B22, B20) em RGB: para realce óxidos e hidróxidos de ferro, minerais contendo hidroxila e sílica. Nesse triplete pressupõe que a presença conjunta dos óxidos e hidróxidos de ferro, minerais contendo hidroxila (sericita (illita), caolinita, etc) e o quartzo exibam-se em branco. Isto ocorre porque as diferenças e as razões entre os conjuntos de bandas B6B8, B11B14 e B22B20 são altas para os óxidos e hidróxidos de ferro, minerais contendo hidroxila e sílica, respectivamente;

♦ (B13, B11), (B12, B16) e (B12, B14) em RGB: para realce dos minerais contendo hidroxila. Esse triplete pressupõe que a sericita (illita) + caolinita + clorita exibam-se em branco, sericita(illita) + caolinita em magenta e sericita(illita) + caolinita + pouca clorita em amarelo. Nesse caso, as diferenças e razões entre todos os conjuntos de bandas são altas para todos os grupos de minerais citados acima, com exceção das bandas B12B16 e B12B14 que são baixas para a sericita(illita) + caolinita e para sericita(illita) + caolinita + pouca clorita, respectivamente;

♦ (B12, B16), (B12, B14) e (B15, B17) em RGB: para realce dos minerais contendo hidroxila. Esse tripleto pressupõe que a sericita(illita), clorita e caolinita exibam-se em amarelo, magenta e branco, respectivamente. Isto ocorre porque as diferenças e razões entre todos os conjuntos de bandas são altas para minerais citados acima, com exceção dos conjuntos B15B17 e B12B14 que são baixas para a sericita(illita) e para a clorita, respectivamente;

♦ (B13, B14), (B13, B15) e (B13, B16) em RGB: para realce das zonas de alteração hidrotermal. Nesse tripleto pressupõe que a zona da sericita e zona propilítica exibam-se em branco e cian, respectivamente. Isto ocorre porque as diferenças e razões entre todos os conjuntos de bandas são altas para zonas de alteração citadas acima, com exceção do conjunto B13B14 que é baixa para os minerais da zona propilítica;

♦ (B11, B14), (B11, B16) e (B11, B18) em RGB: para realce da zona de cisalhamento e a área da mina de Jillawarra. Nesse tripleto pressupõe que a zona de cisalhamento exiba-se em branco. Isto ocorre porque as diferenças e razões entre todos os conjuntos de bandas são altas para os minerais formadores da zona de cisalhamento e da área da mina.

Dentre os conjuntos de bandas relacionados acima, os únicos que alcançaram resultados satisfatórios para as imagens Geoscan AMSS MK-II do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta foram os destinados a realçar as informações espectrais de óxidos e hidróxidos de ferro. São eles:

☺ (B2, B1), (B3, B2) e (B6, B8);

☺ (B6, B7), (B6, B8) e (B6, B9);

As composições coloridas RGB (2-1) (3-2) (6-8) ou (2/1) (3/2) (6/8) e RGB (6-7) (6-8)(6-9) ou (6/7)(6/8)(6/9) para realçar os óxidos e hidróxidos de ferro alcançaram resultados satisfatórios, onde pode-se caracterizar as ocorrências da hematita, da limonita e da goetita (Figuras 4.9 e 4.10).



Figura 4.9 - Composição colorida em RGB (2-1 3-2 6-8)



Figura 4.10 - Composição colorida em RGB (6/7 6/8 6/9)

As composições coloridas RGB (2-1) (3-2) (6-8) ou (2/1) (3/2) (6/8) também realçam os contrastes litológicos entre algumas unidades presente na área. Uma comparação com o mapa geológico da área mostra que essas composições coloridas discriminam os metacherts em azul, os metandesitos em vermelho e o metassedimentos tufáceos em amarelo.

Visualmente, a razão de bandas apresentou resultados melhores na discriminação dos minerais, pois delimitou com maior clareza as suas áreas de ocorrência de ocorrência.

O processamento digital utilizado para realçar os minerais contendo hidroxila discriminou grandes áreas de concentração (Figuras 4.11). Os resultados das análises de espectrometria e de difratometria raios-X mostram uma grande quantidade dos filossilicatos illita e caolinita e ampla dispersão (presente em todas as amostras da área). Portanto, esse processamento discriminou minerais oriundos de intemperismo.

4.3.4 - Principais Componentes

A técnica *Feature Oriented Principal Component Selection* (FPCS) (Crósta & Moore, 1989; Crósta, 1990), posteriormente adaptada por Loughlin (1991) que a denominou de "Técnica Crósta", é baseada na Análise por Principais Componentes (APC). Originalmente desenvolvida para realçar a informação espectral relativa a óxidos e hidróxidos de ferro e adaptada por Loughlin (op.cit.) para exploração de zonas de alteração hidrotermal relacionadas a mineralização auríferas. Esses autores utilizaram imagens Landsat/TM.

A técnica consiste na pré-seleção de dois conjuntos de bandas, no caso do TM, baseada no comportamento espectral de dois conjuntos de minerais, os óxidos e hidróxidos de ferro e minerais com o radical hidroxila e carbonatos.

A técnica pode ser dividida em três etapas (Loughlin, op. cit; Crósta & Rabêlo, 1993). Na primeira, aplica-se às imagens (normalmente um sub-conjunto de 4 bandas espectrais pré-selecionadas de acordo com a curva espectral do mineral que se deseja realçar) a Análise por Principais Componentes (APC). A seguir analisa-se a contribuição de cada banda original para



Figura 4.11 - Composição colorida em RGB (12/16 12/14 15/17)

cada imagem PC. A segunda etapa compreende o desenvolvimento de um modelo, relacionado o comportamento espectral dos materiais de interesse a cada uma das bandas originais. Isto foi feito com base em propriedades espectrais obtidas em bibliografia e em análises espectralradiométricas dos solos da área de estudo. A terceira etapa abrange a seleção de PCs contendo a informação desejada, com base na resposta dos minerais de interesse e nas porcentagens de contribuição das bandas originais.

4.3.4.1 - Aplicação de FPCS na Detecção de Hidróxidos/Óxidos de Ferro e Minerais com Hidroxila.

O sensor Geoscan AMSS MK-II, devido à sua alta resolução espectral, permite a identificação de minerais específicos, o que não é possível com o Landsat/TM. Além disso, a sua alta resolução espacial (5 metros) permite a identificação de anomalias espectrais de pequenas dimensões (poucos metros de largura), que geralmente caracterizam as faixas de alteração hidrotermal em superfície.

Desse modo, foram selecionados seis sub-conjuntos de quatro bandas, sendo três para discriminar os hidróxidos/óxidos de ferro, dois para discriminar os minerais com hidroxilas e um para discriminar o quartzo (silica). O modelo de exploração utilizado envolve o reconhecimento de áreas onde ocorrem simultaneamente uma alta concentração dos três grupos (minerais com hidroxila e quartzo provenientes da alteração hidrotermal e óxidos e hidróxidos de ferro associados ao intemperismo de sulfetos, ambos comumente associados à mineralizações auríferas em zonas de cisalhamento). Os sub-conjuntos selecionados são mostrados na Tabela 4.2.

Minerais de interesse	Hematita	Limonita	Goetita	Clorita/ Calcita/ Epidoto	Sericita/ Caolinita	Silica
Bandas GEOSCAN	B1	B1	B1	B1	B1	B1
	B6	B6	B6	B8	B8	B10
	B7	B8	B9	B12	B11	B20
	B12	B12	B12	B18	B15	B23

Tabela 4.2

As Tabelas 4.3A-F apresentam os coeficientes de autovetores definidos pela APC para os sub-conjuntos de 4 bandas da Tabela 4.2, expressos em porcentagens. Desse modo, pode-se ter uma idéia precisa sobre as contribuições relativas das bandas originais para cada PC, podendo-se relacionar essa informação com as curvas espectrais de cada mineral. De modo geral, as duas primeiras PCs concentram informação espectral altamente correlacionada entre as bandas, relacionadas geralmente a sobreamento topográfico, albedo, vegetação e água. Por outro lado, uma das duas últimas PCs (PC3 ou PC4) irá conter informações relacionadas aos minerais de interesse. A determinação de qual delas contém a informação desejada é feita pela análise das porcentagens e dos sinais, conforme descrito a seguir.

Uma vez que hidróxidos/óxidos possuem alta resposta espectral nos comprimentos de onda relativos à banda Geoscan B6 e baixas na B7, B8 e B9 (de acordo com cada mineral), eles serão representados na imagem PC4 por números digitais elevados; considerando porém que a B6 está contribuindo negativamente, os *pixels* contendo os minerais de interesse estão sendo representados por tonalidades escuras na imagem. Para facilitar a visualização, a PC4 foi multiplicada por -1 (negada) para mostrar os *pixels* de interesse em tons claros. A Componente Goetita é mostrada na Figura 4.12.

O mesmo procedimento é feito para os minerais com hidroxila e para sílica (Tabelas 4.3D-F), onde também se conclui que a informação espectral de interesse está contida na PC4 de cada sub-conjunto. Uma vez que os minerais com hidroxilas e o quartzo apresentam alta resposta espectral nos comprimentos de onda relativos às B11, B12 e B-20 e baixa nas B18, B15 e B23, respectivamente, eles serão representados na PC4 com tonalidades escuras. Neste caso, apenas a Componente da Clorita/Calcita/ Epidoto (Tabela 4.3D) necessita ser negada para mostrar os *pixels* de interesse em tonalidades claras. A Componente Sericita é mostradas na Figura 4.13.

	PC1	PC2	PC3	PC4
B1	13.46	36.22	49.49	6.51
B6	33.24	-6.29	0.68	-51.32
B7	41.01	-18.54	-2.67	38.30
B12	12.39	38.95	-47.16	3.87

(A)

	PC1	PC2	PC3	PC4
B1	17.17	31.95	49.15	6.57
B6	32.86	-11.96	0.82	-48.23
B8	33.70	-21.32	-3.19	42.05
B12	16.27	34.77	-46.84	3.15

(B)

	PC1	PC2	PC3	PC4
B1	16.60	32.62	46.83	8.23
B6	32.29	-11.55	3.33	-49.71
B9	35.21	-20.70	-4.70	41.54
B12	15.90	35.13	-45.14	0.52

(C)

	PC1	PC2	PC3	PC4
B1	27.05	1.30	53.60	14.58
B8	7.99	-80.23	-4.63	0.32
B12	30.40	7.24	-7.39	-51.39
B18	34.56	11.23	-34.38	33.71

(D)

	PC1	PC2	PC3	PC4
B1	25.12	-3.07	-55.28	3.52
B8	5.35	-82.38	5.53	1.22
B11	30.92	5.74	20.06	51.73
B15	38.61	8.81	19.13	-43.53

(E)

	PC1	PC2	PC3	PC4
B1	13.13	22.31	-60.13	2.82
B10	11.73	53.45	27.89	0.41
B20	35.02	-10.28	3.88	-52.23
B23	40.12	-13.96	8.10	44.54

(F)

Tabela 4.3 - Auto-vetores obtidos por Principais Componentes para quatro bandas do Geoscan AMSS MK-II, expressos em porcentagens.

Os resultados obtidos com a "Técnica Crósta" foram combinados no sistema colorido RGB, para favorecer a discriminação das áreas de ocorrência dos minerais de alteração hidrotermal em conjunto.

A Figura 4.14 mostra a junção das imagens goetita, sericita e sílica em RGB. A Figura 4.15 segue a proposta de Loughlin (1991), mostrando as imagens goetita, a adição da goetita mais a sericita e sericita em RGB. Desta forma, as áreas em branco nas imagens são as áreas de ocorrência conjunta desses minerais. A Figura 4.16 mostra a imagem goetita, goetita mais sericita e sericita com a plotagem das anomalias obtidas com as diferentes técnicas de processamento digital imagens e as minas do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta.



Figura 4.12 - PC 4 contendo informação relacionada à goetita.

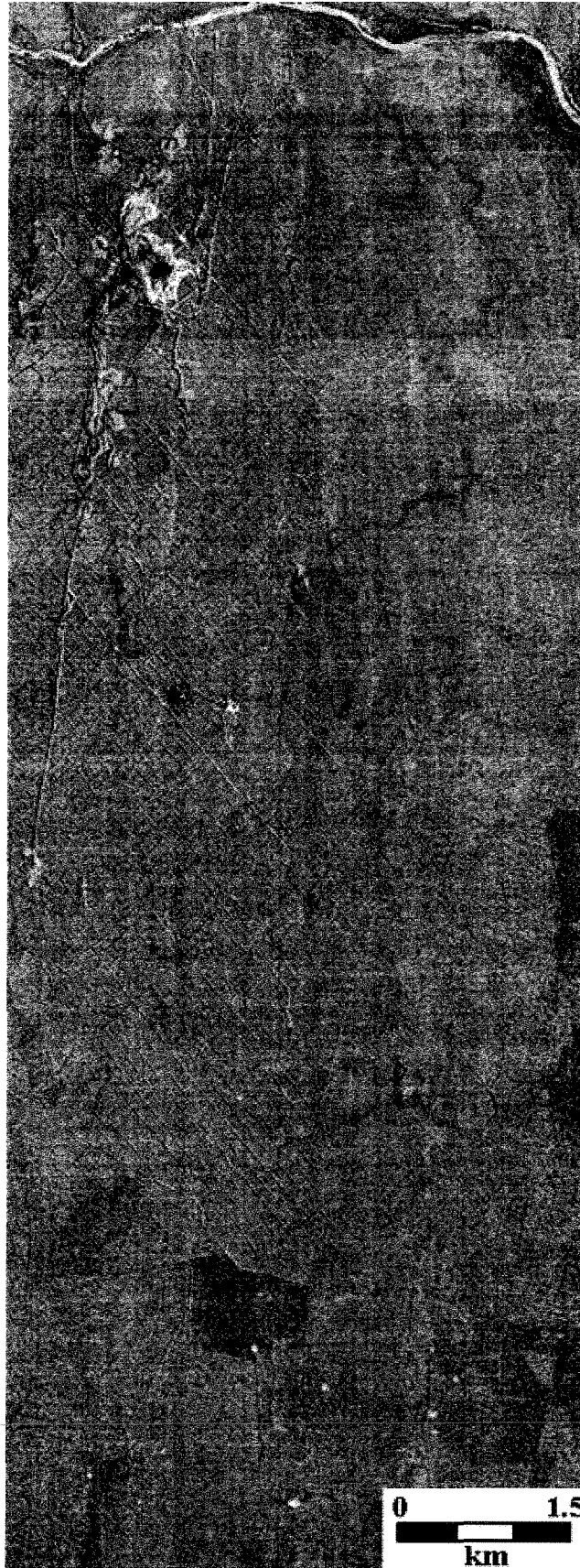


Figura 4.13 -PC 4 contendo informação relacionada à sericita



Figura 4.14 - Composição colorida em RGB das imagens
PC's sericita, goetita e quartz.



Figura 4.15 - Composição colorida em RGB das PC's
goetita, goetita + sericita e sericita.



Figura 4.16 - Composição colorida em RGB das imagens PCs goetita, goetita + sericita e sericita com a localização das anomalias e minas.

4.4 - Discussão

O processamento digital realizado nas imagens multiespectrais de alta resolução espectral e espacial Geoscan AMSS MK-II do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta mostrou que, apesar da área de estudo se localizar em região de vegetação pouco densa e manto de intemperismo incipiente, alcançou resultados satisfatórios no que diz respeito à extração de informações relacionadas a minerais de alteração hidrotermal. As anomalias identificadas são de pequena dimensão, em decorrência da não existência de anomalias de grande porte na área, as quais já foram escavadas. Também, o intemperismo mascara as feições espectrais dos minerais associados à alteração hidrotermal, dificultando ainda mais a localização dessas áreas. Só se observa grandes anomalias onde foi removida a vegetação e/ou existe exposição de rocha, reforçando a hipótese da interferência da vegetação e do intemperismo na discriminação das anomalias espectrais.

Os resultados alcançados apresentam informações úteis na exploração mineral na região do depósitos aurífero da Fazenda Maria Preta. Porém, nessa região, onde os processos lateríticos são atuantes, os resultados necessitam de uma avaliação criteriosa quanto à geologia associada e a origem dos minerais discriminados nas imagens, pois essa pode ter sido hidrotermal ou intempérica.

Algumas anomalias de pequeno porte detectadas pelo processamento digital de imagem estão situadas, de acordo com o mapa geológico, próximas de zonas alteração hidrotermal e de corpos vulcânicos. Algumas dessas anomalias foram alvos de exploração pela Docegeo e pelo menos uma transformou-se em mina (Lajinha Sul).

As técnicas de processamento digital de imagens utilizadas para realçar anomalias de minerais associados a zonas de alteração hidrotermal apresentam resultados muito similares no VNIR e distintos no SWIR.

No VNIR, todas as técnicas utilizadas alcançaram resultados satisfatórios. Pois, delimitou muito bem as anomalias dos óxidos e hidróxidos ferro. Ao passo que no SWIR,

somente a FPCS alcançou bons resultados. Essa técnica delimitou algumas áreas anômalas de minerais desejados, enquanto, as operações aritméticas discriminaram grandes áreas. Possivelmente, discriminaram minerais de origem intempérica. Portanto, a técnica FPCS mostrou-se mais eficiente no realce de informação espectral de minerais de interesse à exploração, embora sendo mais demorada e complexa em relação as operações aritméticas.

CAPÍTULO 5

5.1 - CONCLUSÕES

Através dos estudos dos dados de espectrometria de reflexão, difratometria de raios-X e processamento digital das imagens Geoscan AMSS-MK-II pode-se chegar às seguintes conclusões sobre a área do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta:

- * as curvas espectrais das diversas amostras de solos oriundos das zonas hidrotermalizadas e das encaixantes apresentam comportamento espectral similar. Somente em algumas amostras de solos oriundos das zonas hidrotermalizadas observa-se uma discreta feição de absorção secundária da goetita;
- * o intemperismo originou solos residuais com minerais com radical hidroxila, os quais apresentam as mesmas feições espectrais dos minerais da alteração hidrotermal, dificultando com isso a detecção das áreas com alteração hidrotermal no processamento digital de imagens;
- * a vegetação presente na área interferiu na detecção de anomalias de minerais de interesse;
- * o intemperismo mascarou as zonas com alteração hidrotermal;
- * os resultados obtidos com processamento digital de imagens necessitam de avaliação criteriosa quanto à geologia associada e a origem dos minerais discriminados;
- * o processamento digital apresentou bons resultados na discriminação de diversas litologias;
- * ambas as técnicas de processamento digital, a FPCS e as operações aritméticas, apresentaram bons resultados na delimitação das áreas anômalas em óxidos e hidróxidos de ferro. Ao passo que, somente a FPCS alcançou resultados satisfatórios na delimitação de áreas anômalas nos filossilicatos;

* a técnica FPCS mostrou-se mais eficiente no realce de informação espectral de minerais de interesse à exploração na região do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta;

Desta forma, conclui-se que o uso de imagens de alta resolução espectral e espacial Geoscan AMSS MK-II na detecção de zonas de alteração hidrotermal no depósito aurífero da Fazenda Maria Preta é limitado pelos efeitos do intemperismo sobre os minerais de origem hidrotermal e pelo processo de formação dos solos residuais que recobrem as zonas de alteração hidrotermal e suas encaixantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 Australian 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. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 10. Santo Antonio, Texas, 1994. *Proceedings...* Santo Antonio, v.2, p.651-666.
- ANDREWS, J.R. *et al.* 1992. *A short course in structural geology, fluids and mineralization*. Apostila, University of Southampton.
- ASHLEY, R.P. & ABRAMS, M.J. 1980. *Alteration mapping using multispectral images - Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada*. USGS File Report, p.80-367.
- BARRUETO, H.R.; OLIVEIRA, E.P. & XAVIER, R.P. 1996. Rochas subvulcânicas ultrassódicas e lamprófiros no greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia: implicações na metalogênese do ouro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39. Salvador, 1996. *Anais...* Salvador, SBG. v.3, p.253-256..
- BIONDI, J.C. 1990. Metalogenias dos depósitos minerais em zonas de cisalhamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36. Natal, 1990. *Anais...* Natal, SBG. v.3, p.1267-1274.
- BUCKINGHAN, W.F. & SOMMER, S.E. 1983. Mineralogical characterization of rock surfaces formed by hydrothermal alteration and weathering application to remote sensing. *Economic Geology*, 78 (4): 664-674.

- CARVALHO, E.D.R. 1991. *Caracterização petrográfica e geoquímica das litologias na mina de ouro da Fazenda Maria Preta no greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia*. Campinas, São Paulo. 92 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas)., 1991, 92p.
- CASTLEMAN, K.E. 1978. *Digital Image Processing*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- CHAVEZ Jr., P.S. 1975. Atmospheric, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery. In: *Proceedings American Society of Photogrammetry*, Arizona, Texas.
- CHAVEZ Jr., P.S. 1982. Statistical method for selecting Landsat/MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Eng.*, 8:23-30.
- CLARK, R.N.; SWAYZE, A.J.; GALLAGHER, A.J.; KING, T.V.V. & CALVIN, W.M. 1993. *The USGS Digital Spectral Library Version 1: 0.2 to 3.0 mm*. USGS, Denver, CO. Open File Report 93-592.
- COLWELL, R.N. 1984. *Manual of Remote Sensing*. Falls Church, Virginia. American Society of Photogrammetry.
- CRÓSTA, A.P. 1990. *Mapping of residual soils by remote sensing for mineral exploration in SW Minas Gerais state, Brazil*. London, 452 p. (Tese de Doutorado, Imperial College, University of London)..
- CRÓSTA, A.P. 1990. Discriminação de principais componentes em imagens de satélite com base em relações quantitativas e espectrais. In: SIMP.QUANT.GEOCIÊNCIAS, 4. Rio Claro, 1990. *Anais...* Rio Claro, v.1.
-
- CRÓSTA, A.P. 1992. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas - IG-UNICAMP. 170p.

- CRÓSTA, A.P. 1993. Caracterização espectral de minerais de interesse à prospecção mineral e sua utilização em processamento digital de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENS.REMOTO, 7. Curitiba, 1993. *Anais...* Curitiba, SBG. v.3, p.202-210.
- CRÓSTA, A.P.; PRADO, I.D.M. do; OBARA, M. 1996. The use of Geoscan AMSS data for gold exploration in the Rio Itapicuru Greenstone Belt (BA), Brazil. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 11. Las Vegas, Nevada, 1996. *Proceedings...* Las Vegas.
- CRÓSTA, A.P. & MOORE, J.McM. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais state, Brazil: a prospecting case history in *greenstone belt* terrain. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 7. Calgary, Canada, 1989. *Proceedings...* Calgary, p.1173-1187.
- CRÓSTA, A.P. & RABÊLO, A. 1992. Detecção de alteração hidrotermal em regiões subtropicais através do processamento digital de imagens LANDSAT/TM: possibilidades e limitações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo, 1992. *Anais...* São Paulo, SBG. v.2, p.145-146.
- CRÓSTA, A.P. & RABÊLO, A. 1993. Assessing LANDSAT TM for hydrothermal alteration mapping in central-western Brazil. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 9. Pasadena, California, 1993. *Proceedings...* Pasadena, v.2, p.1053-1061.
- 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*, El Paso: Texas, v.79, p.553-557.
- DAVISON, I.; TEIXEIRA, J.C.; SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B. & MATOS, F.M.V. 1988. The Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil: structure and stratigraphical outline.

- DOCEGEO. 1991. *Geologia do depósito aurífero da Fazenda Maria Preta*. Salvador. (Relatório Interno).
- 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. In: AUSTRALASIAN REMOTE SENSING CONFERENCE, 5. Perth, Australia, 1990. *Proceedings...* Perth, v.2, p.924-927.
- DRURY, S.A. 1987. *Image Interpretation in Geology*. London. Allen & Unwin, 243p.
- DRURY, S.A. 1989. *Remote Sensing Course Book*. Open University. Heerlen, 383p.
- EDWARDS, R. & ATKINSON, K. 1986. *Ore Deposits Geology*. Chapman and Hall Ltd. New York, 466p.
- ELVIDGE, C.D. & LYON, R.J.P. 1984. Mapping clay alteration in the Virginia Range - Comstock Lode, Nevada, with airborne thematic mapper imagery. In: THEMATIC CONFERENCE REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 3. Colorado Springs, 1984. *Proceedings...* Colorado Springs, p. 161-170.
- FERREIRA Jr., L.G.; MENESES, P.R. & JOST, H. 1992. Detecção de zonas de alteração hidrotermal por análise de imagens TM e medidas espectrorradiométricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo, 1992. *Anais...* São Paulo, SBG. v.2, p.155-156.
- FERREIRA Jr., L.G.; MENESES, P.R. & MARTINS, E.S. 1993. Efeitos do intemperismo sobre o comportamento espectral de produtos de alteração hidrotermal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENS.REMOTO, 7. Curitiba, 1993. *Anais...* Curitiba, SBG. v.3, p.28-35.

- FIGUEIREDO, M.C.H. 1989. Geochemical evolution of eastern Bahia, Brazil: A probable Early Proterozoic subduction related magmatic arc. *Journ. of South Amer. Earth Sci.*, vol.2, nº 2, p. 131-145.
- 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: successful Australian case histories. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 5. Reno, 1986. *Proceedings...* Reno, p.63-84.
- GAAL, G.; TEIXEIRA, J.B.G.; DEL REY SILVA, J.L.H. & SILVA, M.G. 1987. New U-Pb data from granitoids, reflecting early Proterozoic crustal evolution in northeast Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATION (ISGAM), Salvador, Bahia, Brazil.
- GEOSCAN. 1992. *Apostila do Curso*. Rio de Janeiro. DOCEGEO-(interno).
- GOETZ, A.F.H. 1982. Imaging spectrometry for earth observations. *Episodes*, Herndon: Virginia, v.15, n.1, p.7-15.
- GOETZ, A.F.H.; HAUFF, P.; SHIPPERT, M. & MAECHER, A.G. 1991. Rapid detection and identification of OH-bearing minerals in the 0.9-1.0µm region using a new portable field spectrometer. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 8. Denver, 1991. *Proceedings...* Denver, p.1-11.
- GOETZ, A.F.H. & ROWAN, L.C. 1981. Geologic remote sensing. *Science*, 211, p. 781-791.
- GROVE, C.I.; HOOK, S.J. & PAYLOR II, E.D. 1992. *Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers*. Pasadena, California: JPL Publication 92-2 and NASA-JET Propulsion Lab.

- GUN, M.J.; HONEY, F.R.; LYON, R.J.P. & FURNELL, R.G. 1989. Geoscan AMSS leads to gold mineralisation at crossroads, Queensland. In: NQ GOLD '89 CONFERENCE, Townsville, Australia, 1989. *Proceedings...* Townsville, Australian Institute of Mining and Metallurgy, p.139.
- GUO, J.L. 1991. Balance contrast enhancement techniques and its application in image colour composition. *Internacional Journal of Remote Sensing*, 57(9):1163-1169.
- HERNANDES, G.L.S. 1994. *Processamento digital de imagens Landsat/TM e Geoscan/AMSS na caracterização lito-estrutural e delimitação de alteração hidrotermal na área do depósito aurífero de Riacho dos Machados (MG)*. Campinas, 134 p. (Tese de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas).
- HONEY, F.R. & DANIELS, J.L. 1986. Rock discrimination and alteration mapping for mineral exploration using the Carr Boyd/Geoscan airborne multi-espectral scanner. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 5. Reno, Nevada, 1986. *Proceedings...* Reno, p.267-278.
- HUCKERBY, J.A.; MAGEE, R; MOORE McM. & COATES, D. 1986. Thematic Mapper applied to alteration zone mapping for gold explaration in Southeast Spain. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGY REMOTE SENSING, 5. Reno, Nevada, 1986. *Proceedings...* Reno, p.501-513.
- HUNT, G.A. 1994. *Geological applications of reflected and emitted multiespectral dat over lateristised Archean terrain in Western Australia*. (Tese de Doutorado, Open University).
- HUNT, G.R. 1979. Near-infrared (1.3-2.4 μm) spectra of alteration minerals - Potential for use in remote sensing. *U.S. Geological Survey*, M.S.964.
- HUNT, G.R. & ASHLEY, R.P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, El Paso: Texas, v.74, p.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, p.283-300.

- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LENHOFF, C.J. 1973. Visible and near-infrared spectra of minerals rocks: VI Additional silicates. *Modern Geology*, vol.4, p.85-106.
- 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. In: ASEG CONFERENCE AND EXHIBITION, 8. Sydney, 1991. *Abstracts, Advances in Mineral Exploration...* Sydney, Australian Society for Exploration Geophysicists, p.1821.
- HUNTINGTON, J.F. & GREEN, A.A. 1988. Recent advances and practical considerations in remote sensing applied to gold exploration. In: Bicentennial Gold'88, Melbourne, Australia.
- INDA, H.A.V. & BARBOSA, J.F. 1978. *Texto explicativo para o mapa geológico do Estado da Bahia, escala 1:1000000*. Salvador: SME/CPM, 137p.
- INDA, H.A.V. & DUARTE, F.B. 1980. *Geologia e recursos minerais do estado da Bahia, Textos Básicos*. Secretária de Minas e Energia, Salvador (Brasil), v.3, 42p.
- INDA, H.A.V.; PIRES, A.E.; PORTELA, A.C.P. & SANTOS, E.L. 1976. *Projeto rochas básicas e ultrabásicas de Euclides da Cunha: relatório final*. Petrópolis: PROSPEC. Convênio SME-PROSPEC.
- 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.
- KISHIDA, A. 1979. *Caracterização geológica das sequências vulcano-sedimentares do médio Rio Itapicuru, Bahia*. Salvador, 98 p. (Dissertação de Mestrado, Univ.de Federal da Bahia).
- KISHIDA, A. & RICCIO, L. 1980. Chemostratigraphy of lava sequences from the Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil. *Precambrian Research*, Amsterdam: Elsevier, v. 11, p.1-17.

- KISHIDA, A.; SENA, F.O. & SILVA, F.C.A. 1991. Rio Itapicuru greenstone belt: geology and gold mineralization. In: Ladeira, E.A. (ed.). *Proceedings of Brazil Gold'91: The Economics, Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. 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*, v.91 (B1), p.767-783.
- KRUSE, F.A. 1988. Use of Airbone imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada, and California. *Remote Sensing of Environment*, v.24, p.31-51.
- LAMB, A.D. & PENDOCK, N.E. 1989. Band prediction techniques for the mapping of hydrothermal alteration. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 7. Calgary, 1989. *Proceedings...* Calgary.
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 3ª Edição, 750p.
- LIMA, R.F.F.; RIBEIRO, A.F.; ANDRADE, A.R.F.de; GUIMARÃES, J.M.; ROCHA NETO, M.B.; OLIVEIRA, M.T.M.de; BRITO, R.S.C. & SOUZA, W.S.T. 1981. Projeto Euclides da Cunha: Fase II, etapa 1B. Salvador: CBPM. Convênio SME/CBPM/Caraíba Metais.
- LOBATO, L.M. 1992. *Hidrotermalismo e processos de deformação de depósitos hidrotermais*. Apostila. Universidade Federal de Minas Gerais.
- LOPES, C.A.M. 1982. *Algumas características geológicas das mineralizações de ouro da jazida da Fazenda Brasileiro, Bahia*. Salvador, 99 p. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia).

- LOUGHLIN, W.P. 1991. Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(9), p.1163-1169.
- LYON, R.J.P. 1994. Weathering and desert varnish in arid terrains: spectral effects in deeply-weathered mafic, ultrabasic, and felsic rocks, Yilgarn Block, Central Western Australia. In: FIRST INTERNATIONAL AIRBORNE REMOTE SENSING CONFERENCE ANDEXHIBITION. Strasbourg, França.
- LYON, R.J.P. & HONEY, F.R. 1990. Direct mineral identification (DMI) with Geoscan MK-II advanced multi-spectral scanner (AMSS). Proceedings, Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Proceedings Series 1298*, p.50-61.
- MAGEE, R.W., MOORE, J.McM. & BRUNNER, J. 1986. Thematic Mapper data applied to mapping hydrothermal alteration in southwest New Mexico. In: THEMATIC CONFERENCE REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 5. Reno, 1986. *Proceedings...* Reno, p.373-382.
- MARIMON, M.P.C. 1986. Estudo da alteração hidrotermal relacionada mineralização aurífera na Fazenda Brasileiro (BA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34. Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia, SBG. v.3, p.1556-1570.
- MARINHO, M.M. & SABATE, P. 1982. The Contendas-Mirante volcano-sedimentary sequence and its granitic-migmatitic basement. In: ISAP-INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARCHEAN AND EARLY PROTEROZOIC GEOLOGIC EVOLUTION AND METALLOGENESIS. *Field Trip Guidebook*. Salvador, SBG e Sec.Minas e Energia do Est.da Bahia, p.139-184.
- MASCARENHAS, J.F. 1973. A geologia do centro-leste do Estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27. Aracaju, 1973. *Anais...* Aracaju, SBG. v.2, p.35-66.

- MASCARENHAS, J.F. 1976. Estruturas do tipo greenstone belt no leste da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29. Ouro Preto, 1976. *Anais...* Ouro Preto, SBG. v.4, p.25-49.
- MATOS, F.M.V. & DAVISON, I. 1987. Basement or intrusion? The Ambrosio dome, Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITS AND ASSOCIATION MINERALIZATIONS (ISGAM). Salvador, Bahia, Brazil, 1987. *Extended Abstract*, Salvador, p.133-135.
- MATHER, P.M. 1987. *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. John Wiley & Sons. Chichester, 352p.
- MELLO, E.F.; XAVIER, R.P. & TASSINARI, C.C.G. 1996. A review on the geochronology of the Rio Itapicuru greenstone belt, NE Bahia (Brazil), and the timing of the lode-gold deposits. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39. Salvador, 1996. *Anais...* Salvador, SBG. v.7, p.273-276.
- MELO, G., Jr. 1990. *Geochemical investigation of the hydrothermal alteration zone surrounding the greenstone-hosted Fazenda Brasileiro gold deposit, Bahia*. Colorado, 547 p. (Tese de Doutorado, Colorado School of Mines).
- 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 semidetalhe*. (Tese de Doutorado, IG-USP).
- 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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENS. REMOTO, 7. Curitiba, 1993. *Anais...* Curitiba, SBG. v.3, p.266-274.

- MOORE, J.McM. & GUO, J.L. 1990. Image enhancement of epithermal gold deposit alteration zones in southeast Spain. In: REMOTE SENSING: AN OPERATION TECHNOLOGY FOR THE PETROLEUM AND MINERALS INDUSTRIES. London, 1990. *Proceedings...* London, Institution of Mining and Metallurgy, p.49-58.
- NEVES, B.B.B.; CORDANI, U.G. & TORQUATO, J.R.F. 1980. Evolução geocronológica do estado da Bahia. In: Inda, H.A.V. and Duarte, F.B. (ed.). *Geologia recursos minerais do estado da Bahia, Textos Básicos*. Sec. de Minas e Energia, Salvador (Brasil), v.3, p.1-10.
- NOVO, M.L.M. 1992. *Sensoriamento Remoto - Princípios e Aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1992. 2ª Edição, 308p.
- OLIVEIRA, E.A.S.; SOARES, A.S.B. & SANTANA, W.R. 1991. Fazenda Maria Preta gold deposit. In: Fleisher, R, Grossi, J.H., Fuzikawa, K. and Ladeira, E.A. (eds.), *Field and mine trip to gold mineralizations of the northeastern Bahia. Brazil Gold 91. Excursion Guide*, p.35-41.
- PARADELA, W.R. 1986. Avaliação preliminar de dados TM-LANDSAT 5 para exploração mineral na região Amazônica: intrusivas de Maracaná e Maicuru (Pará). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34. Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia, SBG. v.6, p.2951-2964.
- PODWYSOCKI, M.H.; McGEE, L.G. & SUTLEY, S.J. 1983. Near-infrared spectra of West Shasta gossans compared with true and false gossans from Australia and Saudi Arabia. *Economic Geology*, 80(8): 2230-2239.
- 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.

- REINHARDT, M.T. & DAVISON, I. 1990. Structural and lithologic controls on gold deposition in the shear zone-hosted Fazenda Brasileiro mine, Bahia State, Northeast Brazil. *Economic Geology*, El Paso: Texas, vol.85, n.5, p.952-967.
- ROBERT, F. 1992. *Structural characteristics and history of gold deposits of the Itapicuru greenstone belt: a report prepared for CBPM and CIDA*. Ottawa: Geological Survey of Canada.
- ROCHA NETO, M.B. 1981. *Projeto Euclides da Cunha: fase 3*. Salvador: CBPM. Convênio SME-CBPM.
- ROCHA NETO, M.B. 1994. *Geologia e recursos minerais do greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia*. CBPM, Salvador, Bahia, vol.4, 30p.
- ROLIN, S.B.A. 1990. Caracterização espectrorradiométrica de materiais da cobertura laterítica de rochas dos Grupos Igarapé Bahia, Igarapé Pojuca e Rio Fresco, da Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 36. Manaus. *Anais...* Manaus, SBG. v.1, p.607-612.
- RUBIN, T.D. 1993. Spectral mapping with imaging spectrometers. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Bethesda: MD, vol.59, n.2, p.215-220.
- SÁ, E.F.J.de. 1982. Nota sobre o estilo estrutural e relações gnaisses vs. supracrustais no greenstone belt de Serrinha (Ba). *Ciências da Terra*, Salvador: Bahia, vol.2: 8-13.
- SABATE, P.; MARINHO, , M.M.; VIDAL, P. & CAENVACHETTE, M. 1990. Continental collision affinites of the lower Proterozoic peraluminous granitic of the São Francisco craton, Brazil.
- SABINS Jr, F.F. 1987. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York, W.H.Freeman and Co., 1987, 449p.

- SEIXAS, S.R.M.; MARINHO, M.M.; MORAES FILHO, O.M. & AWDZIEJ, J. 1975. *Projeto Bahia II: geologia das folhas de Itaberaba e Serrinha, relatório final*. Salvador: CPRM. Convênio DNPM-CPRM.
- SCHOBENHAUS, C. & COELHO, C.E.S. 1988. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília, DNPM-CVRD, v.3, 670p.
- SIEGAL, B.S. & GILLESPIE. 1980. *Remote Sensing in Geology*. New York, Wiley.
- SIEMS, P.L. 1991. *Hydrothermal alteration for mineral exploration Workshop*. Apostila. University of Idaho, 1991, 243p.
- SILVA, F.C.A. 1986. *Nota prévia sobre zonas de cisalhamento com e sem mineralizações auríferas no greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia*. Salvador: DOCEGEO, Distrito Leste (Relatório Interno).
- SILVA, F.C.A.; CHAUVET, M. & GUERROT, C. (inédito). Structural and Geochronological constraints on the paleoproterozoic evolution of the Rio Itapicuru greenstone belt (Bahia, Brazil): a combination between archaic (vertical) and modern-type (horizontal) tectonic styles.
- SILVA, F.C.A. & MATOS, F.M.V. 1987. Caracterização e evolução da zona de cisalhamento aurífera da área Antas do *greenstone belt* do Rio Itapicuru, Bahia, Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 1. Salvador, 1987. *Anais...* Salvador, SBG. p.57-59.
- SILVA, F.C.A. & MATOS, F.M.V. 1991. Economic geology and structural controls of the orebodies from the Medium Itapicuru gold district: Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil. In: Ladeira, E.A. (ed.). *Proceedings of Brazil Gold'91: The Economics, Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. Balkema, Rotterdam, p.629-635.

- SILVA, M.G. 1983. *A sequência vulcanossedimentar do médio Rio Itapicuru, Bahia: caracterização petrográfica, considerações petrogenéticas preliminares e zoneamento metamórfico*. Salvador. (Dissertação de Mestrado, UFBa).
- SILVA, M.G. 1984. A sequência do médio Rio Itapicuru, Bahia: caracterização petrográfica, considerações preliminares e zoneografia metamórfica. In: Sá, P.V.S.V. e Duarte, F.B.(eds.), *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Textos Básicos. Salvador: Secretaria de Minas e Energia, v.5, p.6-42.
- SILVA, M.G. 1987. *Geochemie, petrologie and geotektonische entwicklung eines Proterozoischen greunsteingnertels, Rio Itapicuru, Bahia, Brasilien*. Frieberg, 141 p. (Tese de Doutorado, University of Frieberg, Alemanha).
- SILVA, M.G. 1992. Evidências isotópicas e geocronológicas de um fenômeno de crescimento crustal Transamazônico, no craton do São Francisco, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo, 1992. *Anais...* São Paulo, SBG. v.2, p.81-82.
- SHIH, T.Y. 1995. The reversibility of six geometric color spaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Bethesda: MD, vol.61, n.10, p.1223-1232.
- SOUZA, G.I.M.; SILVA, F.C.A. da & OLIVEIRA, E.A. do S. 1986. *Prospecção e pesquisa de ouro no greenstone belt do Rio Itapicuru*. Salvador: DOCEGEO, Distrito Leste (Relatório Interno).
- TARANIK, J.V. & CRÓSTA, A.P. 1996. Remote sensing for geology and mineral resources an assessment of tools for geoscientists in the future. In: ISPRS Congress, 18. Viena, 1996. *Proceedings...* Viena, Vol. XXXI, part 7, Comm.VII, p. 689-698.
- TARDY, Y. 1993. *Pétrologie des laterites et des sols tropicaux*. Masson, Paris.

- TEIXEIRA, J.B.G. 1984. *Geologia e controles da mineralização de ouro da Fazenda Brasileiro, Serrinha (BA)*. Salvador. (Dissertação de Mestrado).
- TEIXEIRA, J.B.G. & KISHIDA, A. 1980. Geologia das mineralizações auríferas estratiformes da Faixa Weber, Araci-Ba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. Camboriú, 1980. *Anais...* Camburiú, SBG. vol.3, p.1802-1811.
- TEIXEIRA, J.B.G. 1985. Geologia e controles da mineralização aurífera em Fazenda Brasileiro, Serrinha (Ba). In: Sá, P.V.S.V. e Duarte, F.B. (eds), *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Textos Básicos*. Salvador: Secretaria de Minas e Energia, v.6: p.9-49.
- TEIXEIRA, J.B.G.; KISHIDA, A. & MARIMON, M.P.C. 1990. The Fazenda Brasileiro gold deposit, Bahia: geology, hydrothermal alteration, and fluid inclusion studies. *Economic Geology*, El Paso: Texas, v.85, p.990-1009.
- VANE, G. & GOETZ, A.F.H. 1988. Terrestrial imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, Bethesda: MD, v.24, p.1-29.
- VICTORASSO, J.B.G. *et al.* 1991. The Fazenda Brasileiro gold mine, Teofilândia, Bahia: general geological aspects. In: Fleisher, R., Grossi, J.H., Fuzikawa, K. & Ladeira, E.A. (eds.), *Field and mine trip to gold mineralizations of the northeastern Bahia. Brazil Gold'91. Excursion Guide*. Balkema, Rotterdam, p.1934.
- VITORELLO, I. & GALVÃO, L.S. 1992. Espectroscopia de reflectância e uma nova abordagem estatística para discriminação litológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, São Paulo, 1992. *Anais...* São Paulo, SBG, vol.1, p.167-168.
- XAVIER, R.P. 1987. *Estudos de inclusões fluidas na mina de ouro Fazenda Brasileiro, greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia*. São Paulo, 142 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).

XAVIER, R.P. 1991. *The role of microstructural and fluid processes in the genesis of gold-bearing shear zones: Fazenda Maria Preta mine, Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil*. Southampton, 241 p. (Tese de Doutorado, University of Southampton).

XAVIER, R.P. & FOSTER, R.P. 1991. The role of carbonaceous shear bands in fluid-flow and gold-precipitation in the Maria Preta mine, Bahia, north-east Brazil. In Ladeira, E.A. (ed.), *Proceedings of Brazil Gold'91: The Economics, Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. Balkema, Rotterdam, p.269-277.