

ANGELO EVARISTO SIRTOLI

**DETECÇÃO DA EXPANSÃO DE ÁREA DE  
MINERAÇÃO ATRAVÉS DE TÉCNICAS  
DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Área de Concentração em Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ph.D. Flávio F. Kirchner

CURITIBA

1998



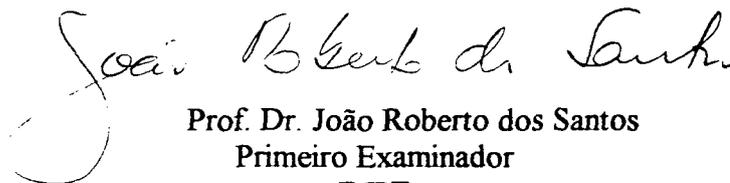
**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**P A R E C E R**

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **ANGELO EVARISTO SIRTOLI**, sob o título **“DETECÇÃO DA EXPANSÃO DE ÁREA DE MINERAÇÃO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO.”**, para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **MANEJO FLORESTAL**.

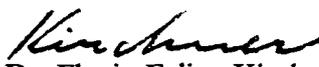
Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela **"APROVAÇÃO"** da Dissertação, com média final: (9,65), correspondente ao conceito: ( *A* ).

Curitiba, 23 de outubro de 1998



Prof. Dr. João Roberto dos Santos  
Primeiro Examinador  
INPE

  
Prof. Dr. Luis Eduardo Mantovani  
Segundo Examinador  
UFPR

  
Prof. Dr. Flavio Felipe Kirchner  
Orientador e Presidente da Banca  
UFPR



A meus pais Orestes Guilherme e

Maria Marmentini Sirtoli

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Desejo externar os meus sinceros agradecimentos às pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. Especialmente:

Ao professor PhD. Flávio Felipe Kirchner pela sua orientação, apoio, amizade e incentivo;

Ao Dr. João Roberto dos Santos, pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela cessão das imagens TM/LANDSAT, bem como pelos comentários e críticas ao presente trabalho.

A empresa Cia. de Cimento Portland Rio Branco do grupo Votorantin por ter autorizado acesso a área de mineração e, especialmente ao chefe de seção – mina, Sr. João Wilson Rodrigues Paes pelas informações cedidas;

Ao curso de Pós Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de aperfeiçoamento;

Ao CNPQ pela concessão da bolsa auxílio;

Aos colegas do curso de pós graduação pela sua amizade e incentivo, principalmente aqueles cuja a convivência e troca de informações foi constante e que direta ou indiretamente contribuíram na execução do presente trabalho.

Particularmente a Eng. Agrônoma M.Sc. Ana Rosa Martins dos Anjos pelo incentivo e estímulo para a realização deste trabalho.

## BIOGRAFIA

ANGELO EVARISTO SIRTOLI, filho de Orestes Guilherme Sirtoli e Maria Marmentini Sirtoli, nasceu em 26 de outubro de 1968, no município de Jacutinga, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

A vida estudantil foi iniciada na Escola Sagrado Coração de Jesus, em Jacutinga, no ano de 1976, sendo concluído o primário em 1979.

O período de 5<sup>a</sup> a 8<sup>a</sup> série foi realizado parte no Colégio São José em Curitiba, PR e parte no Colégio Estadual de Marcelino Ramos, RS.

O segundo grau foi realizado no colégio Santos Anjos, em Porto União, SC, no período de 1984 a 1986.

Em 1988 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal do Paraná, onde graduou-se em meados de 1993.

Em março de 1995 iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela mesma universidade, na área de concentração em Manejo Florestal, tendo como linha de pesquisa o sensoriamento remoto para fins florestais.

Em 1997 ingressou como professor da disciplina de Fotointerpretação no Departamento de Solos da Universidade Federal do Paraná.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 SENSORIAMENTO REMOTO.....	5
2.1.1 IMAGENS DE SENSORES REMOTOS.....	7
2.1.2 O SISTEMA LANDSAT.....	7
2.1.3 NÚMERO DIGITAL, RESOLUÇÃO ESPACIAL E DEFINIÇÃO DE IMAGEM.....	9
2.1.4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS.....	11
2.1.5 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORES REMOTOS.....	16
2.1.6 ANÁLISE VISUAL DE IMAGENS.....	17
2.1.7 ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS.....	19
2.1.8 CORREÇÃO GEOMÉTRICA.....	21
2.2 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS.....	23
2.2.1 MÉTODO DA DIFERENÇA DE BANDAS.....	26
2.2.2 MÉTODO DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	31
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
3.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	39
3.1.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.....	41
3.1.3 SOLOS.....	42
3.1.4 CLIMA.....	43
3.1.5 VEGETAÇÃO ATUAL.....	43

3.1.6 PROCESSOS DE MINERAÇÃO DE CALCÁRIO .....	44
3.2 DADOS UTILIZADOS .....	47
3.2.1 MAPAS .....	47
3.2.2 SISTEMAS COMPUTACIONAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	47
3.3 METODOLOGIA .....	48
3.3.1 DETECÇÃO DE MUDANÇA EM ÁREAS DE MINERAÇÃO .....	48
3.3.1.1 PRÉ-PROCESSAMENTO .....	50
3.3.1.2 ELABORAÇÃO DA REFERÊNCIA DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO MAPEAMENTO .....	51
3.3.1.3 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE SUBTRAÇÃO DE BANDAS .....	53
3.3.1.4 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	55
3.3.1.5 ESCOLHA DO LIMAR DE MUDANÇA .....	58
3.3.2 AVALIAÇÃO DA DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE MUDANÇAS ATRAVÉS DA SUBTRAÇÃO DE BANDAS .....	59
3.3.3 CARACTERIZAÇÃO E ROTULAÇÃO DAS MUDANÇAS .....	60
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1 ESTATÍSTICA E HISTOGRAMAS DAS IMAGENS BRUTAS .....	63
4.2 AVALIAÇÃO DAS IMAGENS RESULTANTES DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS .....	65
4.2.1 AVALIAÇÃO DAS IMAGENS RESULTANTES DA SUBTRAÇÃO DE BANDAS .....	65
4.2.2 AVALIAÇÃO SEMI-QUANTITATIVA DAS IMAGENS RESULTANTES DA SUBTRAÇÃO DE BANDAS .....	70
4.2.3 APLICAÇÃO DO LIMAR DE CLASSIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS IMAGENS RESULTANTES DE SUBTRAÇÃO .....	76
4.2.4 AVALIAÇÃO SEMI-QUANTITATIVA DAS IMAGENS RESULTANTES DA ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS .....	80
4.2.5 APLICAÇÃO DE LIMAR DE MUDANÇA NAS IMAGENS RESULTANTES DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	83
4.3 QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE MUDANÇAS NAS DUAS TÉCNICAS UTILIZADAS .....	85
4.4 ROTULAÇÃO .....	88

<b>5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALGUMAS FORMAÇÕES RELEVANTES PARA A CARACTERIZAÇÃO DO USO DA TERRA, NA REGIÃO DE RADIAÇÃO REFLETIDA.....	12
2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE FOLHAS DE DIFERENTES ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO E CORES .....	13
3 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE SOLOS EM FUNÇÃO DO CONTEÚDO DE MATÉRIA ORGÂNICA, COMPOSIÇÃO MINERAL E TEXTURA .....	14
4 - REFLECTÂNCIA ESPECTRAL MEDIDA A CAMPO DE ROCHAS SEDIMENTARES E VULCÂNICAS TÍPICAS.....	15
5 - HISTOGRAMA DE UMA IMAGEM DIFERENÇA. ENTRE OS NÍVEIS DE CINZA DE 100 A 150 ESTÃO OS PIXELS DE ÁREAS SEM MUDANÇAS.....	29
6 - ILUSTRAÇÃO HIPOTÉTICA DA DISPERSÃO DE PIXELS ASSOCIADOS A COBERTURAS DA TERRA CONSTANTES E OS EIXOS DAS COMPONENTES PRINCIPAIS.....	35
7 - LOCALIZAÇÃO E COORDENADAS CENTRAIS DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE RIO BRANCO DO SUL .....	40
8 - FOTO ILUSTRATIVA DA COLORAÇÃO DO CALCÁRIO CALCÍTICO EM COMPARAÇÃO AO DIQUE DE DIABÁSIO NO CENTRO DA FOTO.....	46
9 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSÃO DE EXPLORAÇÃO MINERAL.....	49
10 - IMAGEM TEMÁTICA (CANALIS 4R, 5G, 3B) DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E PRINCIPAIS CLASSES DE USO DA TERRA NO INTERIOR DA POLIGONAL.....	53
11 - TÉCNICA DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS POR COMPONENTES PRINCIPAIS SELETIVAS .....	56
12 - HISTOGRAMA DEMONSTRANDO OS PIXELS QUE FORAM CONSIDERADOS COMO MUDANÇAS.....	58
13 - HISTOGRAMAS DA BANDA 3 - IMAGENS DE 1987/1996.....	64
14 - HISTOGRAMAS DA BANDA 4 - IMAGENS DE 1987/1996.....	64

15 - HISTOGRAMAS DA BANDA 5 – IMAGENS DE 1987/1996.....	65
16 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS INDIVIDUAIS TM3 TOMADAS EM 1987 E 1996.....	67
17 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS INDIVIDUAIS TM5 TOMADAS EM 1987 E 1996.....	67
18 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS INDIVIDUAIS TM4 TOMADAS EM 1987 E 1996.....	68
19 – VISTA DO DEPÓSITO DE REJEITOS COM GRANDE QUANTIDADE DE MINÉRIO NA SUPERFÍCIE E DA FRENTE DE LAVRA, FACE SW. ....	69
20 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS OBTIDOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO PARA A IMAGEM TRANSFORMADA DA BANDA 3, RESULTANTE DA SUBTRAÇÃO DE BANDAS.....	71
21 – VISTA PARCIAL DA SUPERFÍCIE DO DEPÓSITO DE REJEITOS MAIS ANTIGO COM VEGETAÇÃO EM ESTÁGIO INICIAL DE DESENVOLVIMENTO, FAÇE NW.....	73
22 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS OBTIDOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO PARA A IMAGEM TRANSFORMADA DA BANDA 5, RESULTANTE DA SUBTRAÇÃO DE BANDAS.....	74
23 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA SUBTRAÇÃO DE BANDAS TM3 COM APLICAÇÃO DO LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO.....	78
24 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA SUBTRAÇÃO DE BANDAS TM5 COM APLICAÇÃO DE LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO. ....	79
25 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM3 .....	82
26 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM 5 .....	82
27 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM3 COM APLICAÇÃO DO LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO.....	83
28 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM 5 COM APLICAÇÃO DO LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO.....	84
29 – ROTULAÇÃO DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM 3.....	88
30 – ROTULAÇÃO DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM5.....	89

## LISTA DE TABELAS

1 - BANDAS, FAIXAS ESPECTRAIS E APLICAÇÕES DO LANDSAT TM5 .....	8
2 - MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES .....	17
3 - EXEMPLO DE DEPENDÊNCIA DE ESCALA DAS CHAVES DE INTERPRETAÇÃO .....	18
4 - CARACTERÍSTICAS DAS BANDAS TM .....	47
5 - EXTRATO DE FICHA DE INTERPRETAÇÃO PARA CRIAÇÃO DA MATRIZ DE REFERÊNCIA DE MAPEAMENTO .....	52
6 - ESTATÍSTICAS DA IMAGEM TM/LANDSAT .....	63
7 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO RESULTANTES DA SUBTRAÇÃO DA BANDA TM3 .....	72
8 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO RESULTANTES DA SUBTRAÇÃO DA BANDA TM5 .....	75
9 - TRANSFORMAÇÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS SELETIVAS DAS BANDAS TM3, TM4 E TM5: 1987 E 1996 .....	80
10 - QUANTIFICAÇÃO DA ÁREA DE EXPANSÃO DA MINERAÇÃO ENTRE 1987 E 1996 .....	85

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o diagnóstico e caracterização genérica da expansão de uma mina de calcário calcítico ocorrida num intervalo de nove anos através de técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto. A região onde localiza-se a mina é caracterizada pela intensa exploração mineral, sendo a principal produtora de calcário dolomítico e calcítico, do estado do Paraná, este último é destinado quase exclusivamente para a produção de cimento. A atividade mineradora local é causadora de intensos impactos ao ambiente, apesar de pontual. A área de estudo de 2,6 km<sup>2</sup> possui coordenadas centrais 25°10'24"S, 49°20'18"W e está localizada no município de Rio Branco do Sul, no primeiro planalto paranaense. Foram estudadas as mudanças no sentido de expansão da atividade na mina Saivá. O período considerado foi de 1987 a 1996, onde foi analisada a expansão da atividade mineradora, no sentido de avanço da frente de lavra, decapeamento e aumento dos depósitos de rejeitos, bem como a recomposição florística sobre estes. Foram utilizadas imagens do sensor TM, bandas TM3, TM4 e TM5, do satélite Landsat-5 para detecção das mudanças ocorridas, empregando, como técnicas de detecção de mudanças, a subtração de bandas e análise de componentes principais seletivas de bandas não calibradas dos pares de datas que definem o período. A partir de bandas individuais, foram produzidas imagens temáticas das mudanças observadas. A precisão da detecção foi avaliada em relação a uma amostra de pontos submetidos a análise de campo e interpretação visual, além de dados fornecidos pela empresa. Concluiu-se que as técnicas de mapeamento de mudanças utilizadas foram satisfatórias para verificação e mapeamento da expansão da mineração, sendo que a precisão e o delineamento das mudanças foram superiores quando utilizou-se a análise de componentes principais seletivas de bandas não calibradas.

## ABSTRACT

The purpose of this work was the diagnosis and general characterisation by means of remote sensing image processing of the expansion observed in a limestone mine, which took place in a 9 years period. The studied region shows an intense mining activity and is the largest dolomitic and calcitic limestone producer region of Paraná. From the calcitic limestone, the greatest amount being destined to cement factories. The mining activity caused large impacts on the environment, despite its restricted localization. The center of the studied area has the following geographic co-ordinates: 25° 10'24" S, 49° 20'18" W and it is located at Rio Branco do Sul, State of Paraná. The expansion changes in Saivá mine which occurred in a period of 9 years, between 1987 and 1996, were analysed, more over the mine advancement direction, cover soil extraction and increasing of the refuse deposits as well the revegetalization procedures. Landsat 5 satellite TM images with bands TM3, TM4 and TM5 were used for the detection of the changes. Techniques of bands subtraction and selective principal component analysis of non calibrated bands of a pair of data, which defined the period, were employed. Thematic images of the observed changes were produced based on such bands individually. The detection accuracy was achieved regarding to sample points submitted to field analysis and visual interpretation, complementary to data supplied by the mining company. The conclusion is that the change mapping techniques showed to be a very good quality tool in verifying mine expansion and that the accuracy and outlining of changes were better when selective principal component analysis of non calibrated bands were used.

# 1 INTRODUÇÃO

Historicamente a utilização de fotografias aéreas tem proporcionado informações precisas e confiáveis nos estudos de levantamentos de uso e cobertura vegetal da terra. Por outro lado, o caráter dinâmico do uso e da ocupação do solo inviabilizam a utilização deste instrumento para a obtenção de informações precisas, confiáveis e atualizadas, principalmente devido a demora para a obtenção de produtos de aerolevantamentos e os altos custos envolvidos na sua aquisição. Neste contexto, os produtos usuais de sensoriamento remoto em nível orbital ainda não fornecem melhores alternativas quanto à resolução espacial e possibilidade de análise estereoscópica, porém se apresentam vantajosos ao se considerar a resolução espectral e seu caráter multitemporal, para a execução, monitoramento e atualização da dinâmica do uso e cobertura vegetal da terra.

Os produtos de sensoriamento remoto em nível orbital (imagens de satélite) têm sido nas últimas décadas uma fonte rica e constante de informações sobre a superfície terrestre. Isto aliado ao constante desenvolvimento de *softwares* e *hardwares*, que tem favorecido o desenvolvimento de técnicas para obtenção de informações mais precisas dos dados registrados nas imagens. No entanto, para cada aplicação é necessário o desenvolvimento de um processamento metodológico específico.

Os processos de mapeamento do uso e ocupação do solo com imagens de satélite em nível mundial têm sido utilizados com bons resultados para grandes áreas. Contudo, existem possibilidades de se adaptar a tecnologia existente para usos mais específicos, de caráter particular, que podem otimizar ainda mais o uso desta tecnologia tendo em vista processos de degradação, recomposição ambiental e expansão de exploração em áreas de intensa atividade mineradora.

As pressões antrópicas sobre os ecossistemas naturais através de atividades agrosilvipastoris, urbano-industriais e energético mineradoras, apesar de nem sempre estarem associadas, geram impactos significativos tais como poluição, fragmentação da paisagem e redução da biodiversidade.

Dentre as atividades econômicas relacionadas diretamente à exploração de recursos naturais, a extração mineral é uma das que são capazes de causar grandes perturbações no meio ambiente em situações pontuais ou não. A deterioração da qualidade de vida que geralmente acompanha a degradação ambiental justifica a necessidade de se monitorar com frequência a atividade de extração mineral.

O sensoriamento remoto orbital, por sua inerente repetitividade, é potencialmente uma ferramenta fundamental à execução do monitoramento de áreas de mineração. No entanto, deve-se levar em conta as peculiaridades operacionais da atividade de mineração e da variabilidade de materiais envolvidos na extração mineral. A aplicação do sensoriamento remoto no monitoramento desta atividade requer cuidados metodológicos que são específicos para cada tipo de mineração.

Na região norte de Curitiba, onde localizam-se os municípios de Rio Branco do Sul, Almirante Tamandaré, Colombo e Itaperuçu há uma grande concentração de empresas mineradoras de calcário, que extraem este recurso do ambiente sem efetuar um monitoramento ou controle adequado das áreas de exploração, o que dificulta ao final do processo a recomposição da área.

Sabe-se que qualquer atividade mineradora durante sua operação, agride todo o ecossistema estabelecido no local de sua implantação. As empresas mineradoras de calcário instaladas ao norte da região metropolitana de Curitiba, apesar da maioria serem de pequeno a

médio porte, causam, mesmo que localizados, significativos impactos, principalmente em relação a degradação da paisagem e conseqüentemente ao meio ambiente local.

Desde 1986 (Resolução 001 do CONAMA) e de forma mais contundente com a promulgação da legislação federal (artigo 115 da constituição brasileira de 1988), as áreas degradadas por mineração devem ser recuperadas, isto é, as empresas causadoras do impacto ambiental devem arcar com as medidas de mitigação dos impactos e de recuperação ambiental.

Com a legislação federal, complementada pelas estaduais, requerendo constante monitoramento de áreas mineradas, dados de sensores remotos são úteis para o inventário rápido, freqüente e econômico da expansão e recomposição ambiental das mesmas. Como o reconhecimento constante no campo e a pesquisa aérea são caros e demandam muito trabalho, sistemas por imagens de satélite aparecem como sendo uma promissora ferramenta para programa de inventários e monitoramento da expansão e recomposição de área mineradas.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho foi a avaliação da aplicabilidade de métodos de processamento de produtos de sensoriamento remoto para a detecção automática e caracterização geral da expansão de mineração de calcário calcítico em área de domínio da Floresta Ombrófila Mista.

Para isto, foi pesquisada e realizada a análise comparativa da aplicabilidade de métodos de detecção de mudanças na superfície terrestre baseados primeiramente em subtração simples de bandas e, em segundo lugar com componentes principais seletivas que

se adapta a recursos computacionais de fácil acesso e ao uso de produtos não calibrados do sensor TM a bordo do satélite do Landsat5.

Os objetivos específicos foram:

- a) combinar procedimentos metodológicos de manipulação digital de imagens de satélites para obtenção de imagens temáticas de expansão das atividades de mineração;
- b) diagnosticar a dinâmica dos processos de expansão das atividades mineradoras e dos trabalhos de recomposição ambiental em uma série multitemporal de imagens.
- c) avaliar qualitativamente e semi-quantitativamente a caracterização das mudanças detectadas em cada banda individualmente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo VETORAZZI (1996), o sensoriamento remoto pode ser definido como a ciência e arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno, através da análise de dados coletados por aparelhos denominados sensores, que não entram em contato direto com os alvos em estudo.

O sensoriamento remoto mede as trocas energéticas entre os objetos e o meio ambiente. Essas trocas manifestam-se predominantemente por emissão ou modificações na radiação eletromagnética, ou perturbação nos campos naturais. O sensoriamento envolve a medida de registro da energia no espaço e no tempo. Podemos envolver essas observações em três domínios:

- a) espacial (tamanho, forma e distribuição);
- b) temporal (variações no decorrer do tempo);
- c) físico (trocas energéticas por radiação eletromagnética ou alteração em campos de força).

É no domínio espacial, que grande parte dos esforços tem sido dirigida as técnicas de tratamento digital de imagens, as quais vem possibilitando a identificação, delimitação, mensuração e análise do inter-relacionamento de objetos ou fenômenos. Os diferentes materiais presentes na superfície terrestre devido a suas composições químicas e propriedades físicas apresentam comportamentos distintos ao longo do espectro eletromagnético, para diferentes atributos (emissividade, reflectância, absorbância, transmissividade, luminescência). É nisso que o sensoriamento remoto tem seus fundamentos. Sensores

espaciais são capazes de investigar estes atributos e, eventualmente, discriminar determinados objetos ou fenômenos (AMARAL, 1990).

A aquisição de dados em sensoriamento remoto é realizada basicamente sobre três níveis: nível de laboratório/campo onde utiliza-se o radiômetro, que é um sensor não imageador, essencial para a aquisição de informações detalhadas sobre o comportamento espectral de um determinado objeto na superfície terrestre; nível aéreo no qual os mais comuns são os levantamentos aerofotogramétricos; e nível orbital através dos sensores a bordo de satélites artificiais (NOVO, 1989).

De acordo com WATRIN (1994), dentre os produtos de sensoriamento remoto, aqueles oriundos de sistemas orbitais apresentam algumas vantagens sobre os demais sistemas, para o levantamento e estudo de alvos que apresentam aspectos dinâmicos, tais como feições de cobertura vegetal e uso da terra. Isso deve-se principalmente ao fato que os sistemas orbitais proporcionam um grande fluxo de dados multiespectrais sobre alvos da superfície terrestre de forma repetitiva e sinóptica, a custos relativamente baixos.

Além dessas vantagens, a possibilidade de pesquisa em grandes áreas ou em locais de difícil acesso, imageamento em grande altitude, possibilitando uma visão sinóptica da superfície terrestre, e o imageamento repetitivo que possibilita o monitoramento de grandes áreas. Em aplicações mais específicas, tem sido muito utilizado para detectar poluição, tanto no ar quanto nos oceanos, estudar problemas ambientais, monitorar queimadas e prospecção de recursos minerais, levantamentos florísticos, dentre outras aplicações.

Hoje em dia, com o grande desenvolvimento do sensoriamento remoto, este constitui-se numa poderosa ferramenta de coleta e tratamento de dados e informações e se apresenta como solução estratégica, tanto na caracterização ambiental como no monitoramento de

grandes e pequenas áreas, principalmente com o advento de novos sensores com maior resolução espacial.

### 2.1.1 Imagens de sensores remotos

Os produtos de sensoriamento remoto com maior potencialidade de serem usados na caracterização de uso da terra são as imagens obtidas por sensores remotos. Estudos multicenas, isto é, que consideram imagens obtidas em datas diferentes por um mesmo sensor, requerem considerações sobre a natureza das informações nela contidas.

A principal via para a obtenção de dados de sensoriamento remoto é a energia eletromagnética com a qual toda a matéria interage, ocorrendo reflexão, absorção, transmissão ou emissão de energia. Os sensores imageadores ópticos e termais registram a radiância de materiais contidos num elemento de resolução do terreno.

Segundo NOVO (1989) um sistema sensor pode ser definido como qualquer equipamento capaz de transformar alguma forma de energia em um sinal passível de ser convertido em informação sobre o meio.

### 2.1.2 O Sistema Landsat

O sistema LANDSAT, originalmente denominado ERTS (**Earth Resources Technology Satellite**) foi desenvolvido com o objetivo de se obter uma ferramenta prática no inventário e manejo dos recursos naturais (GARCIA, 1982).

Segundo NOVO (1989), o sistema LANDSAT compõe-se até o momento de uma série de 5 satélites lançados a intervalos médios de 3 a 4 anos. O satélite LANSAT 5 está

posicionado a uma altura de 705 km em relação a superfície e seus sensores varrem uma faixa de 185 km, sendo esta recoberta a cada 16 dias. O sensor a bordo do LANSAT 5 é o TM (**Thematic Mapper**), o qual proporciona uma melhor discriminação espectral entre objetos da superfície terrestre, apresentando uma resolução espacial de 30 m x 30 m no terreno nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. A exceção ocorre para a banda 6 que tem uma resolução espacial de 120m (NOVO, 1989). As imagens do sensor TM do Landsat 5 têm uma dimensão padrão de 6168x6168 pixels e seus quadrantes de 3084x3084 pixels.

O sensor TM é baseado numa série de sensores arranjados para operar em faixas estreitas de comprimento de ondas do espectro eletromagnético. Na Tabela 1 pode-se observar as faixas espectrais do TM e suas respectivas aplicações específicas (NOVO, 1989; AMARAL, 1990).

TABELA 1 - BANDAS, FAIXAS ESPECTRAIS E APLICAÇÕES DO LANDSAT TM5

Bandas	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Principais Aplicações
1	0,45 – 0,52 – Azul	Mapeamento de corpos d'água. Diferença de água e solo. Diferenciação entre vegetação coníferas e de decíduas.
2	0,52 – 0,60 – Verde	Reflectância da vegetação verde sadia
3	0,63 – 0,69 – Vermelho	Absorção da clorofila, diferenciação de espécies vegetais
4	0,76 – 0,90 – Infravermelho próximo	Levantamentos de biomassa. Delineamento de corpos d'água.
5	1,55 – 1,75 – Infravermelho médio	Deteção de umidade da vegetação. Diferenciação entre nuvens e neve
6	10,4 – 11,7 – Infravermelho termal	Umidade da vegetação, geologia
7	2,08 – 2,35 – Infravermelho médio	Umidade da vegetação, solos e geologia

FONTE: Adaptada a partir de NOVO, (1989); AMARAL, (1990).

### 2.1.3 Número digital, resolução espacial e definição de imagem

Uma das características fundamentais dos sensores é seu poder de resolução espacial, genericamente entendido como a capacidade do sistema em separar dois objetos próximos. FORSHAW *et al.* (1983), reconhecem que uma melhor resolução espacial ajuda na identificação e reconhecimento de classes menores de cobertura do terreno. Além disso, ao trabalhar com imagens de datas ou sensores diferentes pode ser necessária uma uniformização quanto à resolução espacial.

Utiliza-se geralmente o IFOV (*“Instantaneous Field of View”*) como medida da resolução espacial dos sensores. O IFOV de um sensor é a área da cena à qual corresponde um único registro da radiância (*pixel*), numa ou mais faixas de comprimento de onda. Para um detetor de determinada dimensão  $D$ , colocado num sensor com distância focal  $f$ , a uma distância  $H$  de uma cena imageada, o IFOV é dado por:

$$\text{IFOV} = HD/f \quad (\text{metros})$$

Para efeitos de comparação com fotografia aéreas correntes, JENSEN (1986) recomenda para as mesmas:

$$\text{IFOV} = S_c / 2400v \quad (\text{metros})$$

Sendo  $S_c$  o denominador da escala da fotografia aérea e  $v$  (frequência espacial) dada em pares de linhas por milímetro. Pode usar-se a mesma relação para imagens orbitais impressas.

Os elementos de imagem (*pixel*) de sensores não fotográficos resultam da conversão do registro de um elemento de resolução do terreno imageado em um nível de cinza, através de fatores de escalonamento que dependem da construção dos processadores (BILLINGSLEY, 1983; ESTES *et al.*, 1983). A imagem digital pode ser entendida como uma matriz cujo elementos são os números digitais (DN) correspondentes aos pixels organizados

espacialmente e pode ser representada por uma matriz de linhas ( $x$ ) e colunas ( $y$ ), e  $z$  para os DN. Cada uma dessas células ou pixels possui também um atributo  $z$ , indicando o nível de cinza, que varia do preto ao branco, representando a intensidade de energia (refletida ou emitida) captada pelo sensor.

Formalmente uma imagem multiespectral  $g_p$ , de  $p$  bandas, pode ser definida como:

$$g_p: S \rightarrow k^p; k = \{0, 1, 2, \dots, k-1\} \cap Z$$

sendo

$S = Z \times Z$  um retângulo finito;

$P =$  número de bandas; e

$k = \{0, 1, 2, \dots, k-1\}$ : níveis de cinza, discretos, nos quais se converte o valor de DN (número digital).

O valor registrado sobre um elemento de resolução no terreno é, pois, um vetor aleatório com tantas observações quantas as bandas. Não só a imagem, tomada como um todo, mas também uma classe de uso da terra nela contida terão suas estatísticas características tais como a média e a variância. Também pode-se encontrar matrizes de covariância entre as várias bandas e efetuarem-se outras transformações próprias da álgebra linear, das quais se destacam a ortogonalização e a diagonalização.

Segundo CROSTA (1992), o histograma é uma das maneiras mais importantes e úteis de se representar a distribuição dos DNs das imagens digitais. O histograma mostra estatisticamente a distribuição dos diversos níveis de cinza dos pixels de uma imagem.

As imagens que chegam ao usuário são geralmente submetidas a pré-processamentos e, eventualmente, a realce.

#### 2.1.4 Comportamento espectral de alvos

Para NOVO (1989), é de fundamental importância o conhecimento do comportamento espectral dos objetos na superfície imageada, como também dos fatores que interferem nesse processo.

No comportamento espectral dos alvos é muito importante os parâmetros relativos ao alvo, visto que a reflectância dos objetos adjacentes, podem interferir nas medidas de reflectância do objeto em si devido ao espalhamento da energia pela vizinhança, proporcionando um teor espectral diferente do que o objeto realmente possui (NOVO, 1989).

A radiação eletromagnética é definida como toda a forma de energia que se move à velocidade da luz, seja na forma de ondas ou de partículas eletromagnéticas (HUNT<sup>1</sup>, citado por SANO, 1988).

Várias são as interações possíveis quando a energia eletromagnética encontra a matéria, quer seja sólida, líquida ou gasosa. Estas interações podem produzir mudanças na radiação eletromagnética incidente. O sensoriamento remoto detecta e registra estas mudanças, e as imagens e os dados resultantes, são interpretados para identificar as características da matéria que produziu tais modificações (GARCIA, 1982).

Os conceitos de uso (atual) da terra e cobertura do terreno têm sido usados indistintamente (PEREIRA *et al.*, 1989) quando são estudados a partir de dados de sensoriamento remoto. Entretanto deve-se considerar que um mesmo uso genérico pode dar origem a distintas formas de expressão da cobertura (diferentes níveis de cinza, por exemplo);

---

<sup>1</sup> HUNT, G. R. *Eletromagnetic radiations: the communication link in remote sensing*. In: SIEGAL; GILLESPIE (Eds) **Remote Sensing in Geology**, New York: John Willey, 1980. p. 5-54.

e também que uma mesma expressão da cobertura pode resultar de diferentes utilizações dadas a terra.

A figura 1 resume o comportamento espectral de algumas formações mais frequentes na superfície terrestre: vegetação, solos, água e calcário.

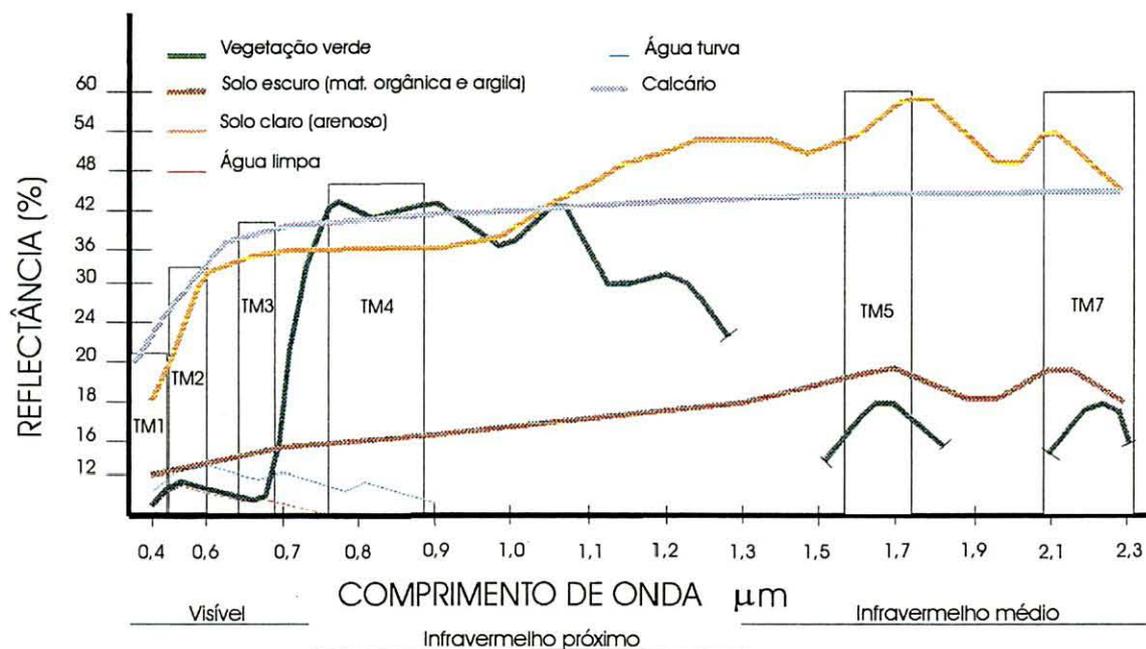


FIGURA 1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALGUMAS FORMAÇÕES RELEVANTES PARA A CARACTERIZAÇÃO DO USO DA TERRA, NA REGIÃO DE RADIAÇÃO REFLETIDA

FONTE: Modificada a partir de HOFFER (1978) e SABINS (1987)

Estas informações não ocorrem de maneira estanque. Ao imagear uma área de exploração mineral, o registro de um sensor incluirá, num mesmo pixel, sinais provenientes das frentes de lavra, do solo e vegetação também do conteúdo de água destes, além de sinais resultantes da atmosfera.

Para a maioria dos alvos, interessa notar que a região visível do espectro eletromagnético é uma região de baixa reflectância, se comparada com o infravermelho. As variações de radiância registradas pelos sensores ópticos em função do comprimento de onda resultam fundamentalmente de fenômenos ao nível atômico e molecular, característicos de cada material.

Na figura 2 podemos observar que há diferenças consideráveis na reflectância das folhas, de acordo com o tipo da folha, particularmente na região do infravermelho próximo. Em folhas mais velhas, a reflectância na região do visível tende a reduzir-se enquanto que esta aumenta no infravermelho próximo. Por outro lado, tecidos de folhas mais novas produzem geralmente valores relativamente altos de reflectância no visível e altos infravermelho.

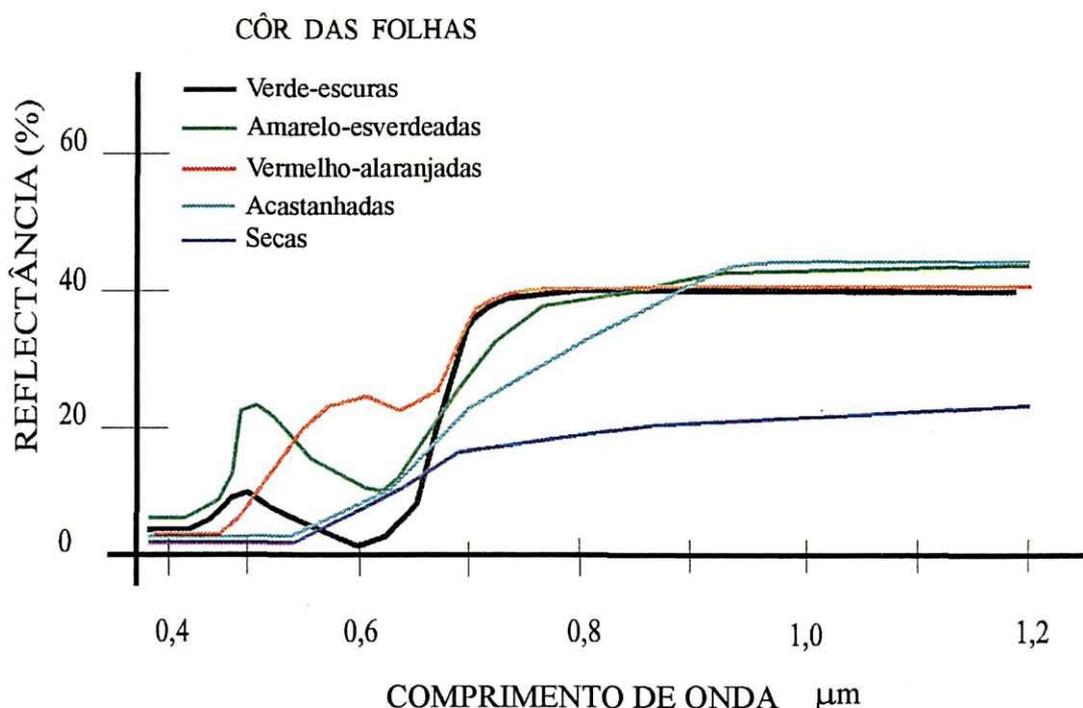


FIGURA 2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE FOLHAS DE DIFERENTES ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO E CORES  
 FONTE: adaptada a partir de PONZONI *et al.* (1994)

No visível o comportamento da vegetação é determinado pelo conteúdo de pigmentos, com um pico de reflectância em torno de 0,55  $\mu\text{m}$  (verde) e na região do infravermelho, pela estrutura das folhas e pela arquitetura do dossel (KUMAR, 1972). Em geral para dosséis densos e homogêneos, o fator de reflectância espectral direcional na região do visível aumenta com a redução do ângulo de visada lateral “*of nadir*” e com o aumento do ângulo de elevação da fonte, o sol (KIMES, 1983).

O comportamento dos solos é determinado por sua granulometria, rugosidade, conteúdo de água e de matéria orgânica e composição mineral (MYERS, 1983). Ilustra-se na figura 3 a influência de matéria orgânica, da composição mineral e da textura no comportamento espectral de solos.

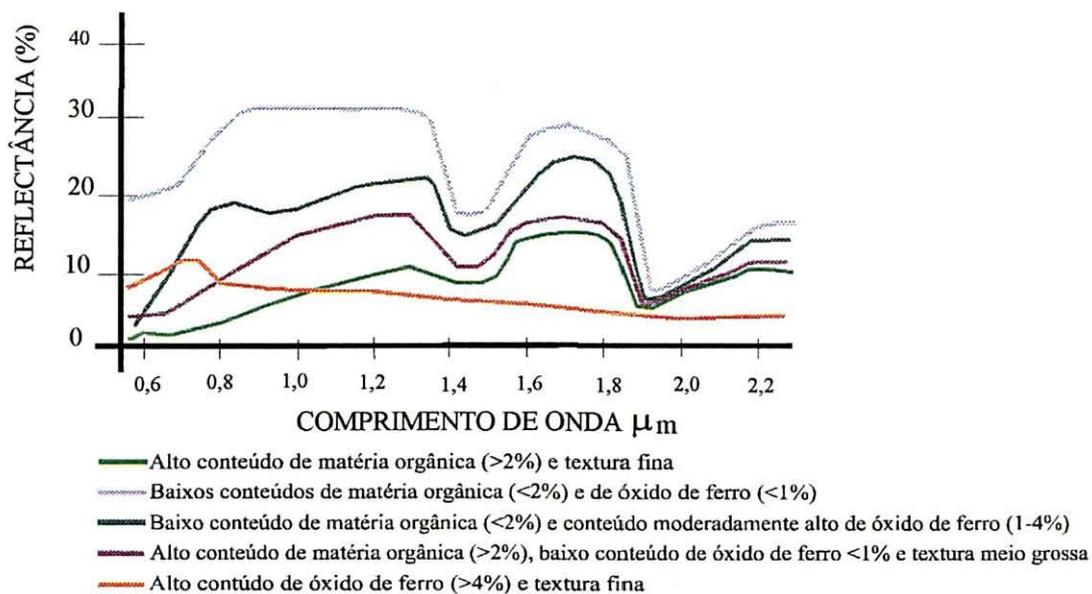


FIGURA 3 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE SOLOS EM FUNÇÃO DO CONTEÚDO DE MATÉRIA ORGÂNICA, COMPOSIÇÃO MINERAL E TEXTURA

FONTE: adaptada a partir de PONZONI *et al.* (1994)

A presença de umidade faz reduzir a reflectância do solo considerado, sem modificar o formato da curva de reflectância. A presença de matéria orgânica correlaciona-se melhor com a reflectância entre 0,5 e 1,2  $\mu\text{m}$ . A presença de ferro geralmente se revela por bandas de absorção em 0,9 e 1,0  $\mu\text{m}$ , para  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$ , respectivamente.

A água limpa não reflete na região do infravermelho podendo, por isso, ser usada como referência na correção atmosférica. No visível o seu espectro é determinado pela presença de material em suspensão ou dissolvido e da biota fotossintetizadora (algas, plancton): o espectro da água limpa é quase uniformemente decrescente e a água turva pode registrar um pico de reflectância na região entre o azul e o verde e ainda uma pequena reflectância no infravermelho próximo (HOFFER, 1978).

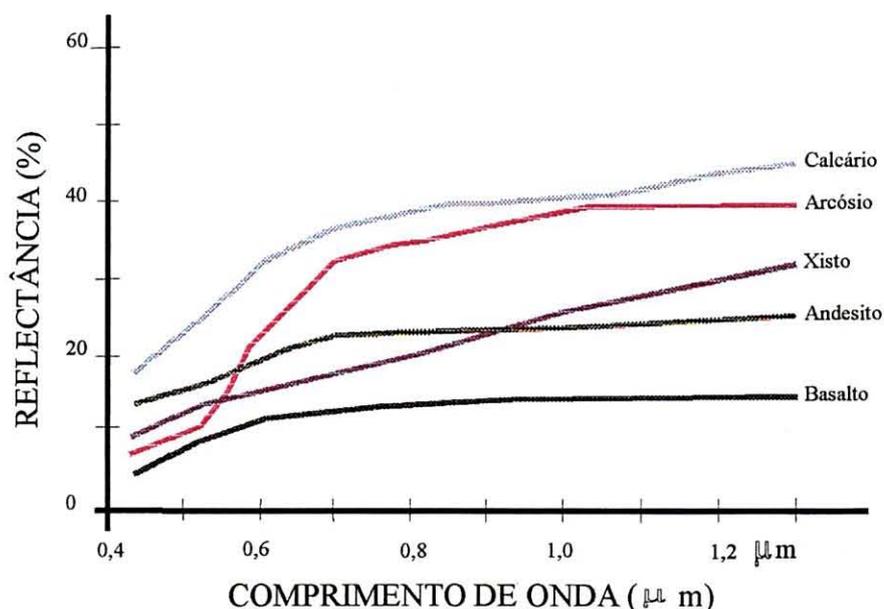


FIGURA 4 – REFLECTÂNCIA ESPECTRAL MEDIDA A CAMPO DE ROCHAS SEDIMENTARES E VULCÂNICAS TÍPICAS.

FONTE: adaptada a partir de SABINS (1987).

Na figura 4 é interessante observar que o calcário é uma rocha que apresenta curva com maior reflectância espectral para os comprimentos de onda apresentados. Esta curva é típica de calcário dolomítico, que normalmente apresenta-se na natureza com coloração caracteristicamente branca.

### 2.1.5 Processamento e interpretação de imagens de sensores remotos

Segundo NOVO (1989), pode-se dividir os métodos de análises de sensoriamento remoto em dois grandes conjuntos:

a) análise digital de imagens, o qual engloba uma série de técnicas de manipulação numérica de dados contidos em imagens digitais. Estes dados digitais normalmente provém de sistemas de varredura multiespectral, que permitem a saída de dados em fitas magnéticas. Para que as imagens digitais possam ser numericamente manipuladas e transformadas em informações sobre a cena de estudo, o usuário precisará dispor de um sistema de análise de imagens digitais, que englobam aspectos relativos aos componentes técnicos de um sistema de processamento “hardware” e também os programas de manipulação de dados “software”;

b) Análise visual de imagens, processo este que baseia-se em certos princípios de análise, que incluem métodos para detectar, identificar e medir objetos observados a partir de uma perspectiva aérea ou orbital. No processo de interpretação, tem-se procedimentos de análise (teste de hipótese, convergência de evidências, etc.), técnicas (modelos de percepção, material complementar, visão estereoscópica) e elementos (tonalidade/cor, tamanho, forma, etc.).

Na tabela 2 podemos identificar as principais diferenças entre a análise visual e digital de extração de informações de dados de sensores remotos, segundo RICHARDS (1993)

TABELA 2 - MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES

ANÁLISE VISUAL	ANÁLISE DIGITAL
feita em grandes escalas	feita a nível de pixel
análise multiespectral ilimitada	pode ser feito ajuste multiespectral
pode assimilar limitado número de níveis de brilho - 16 níveis	pode fazer avaliação quantitativa dos níveis de brilho - até 256 níveis
facilidade na determinação de contornos	determinação de contornos envolve decisão de complexos programas
informação espacial é fácil no sentido qualitativo	técnicas limitadas para usar dados espaciais.

FONTE: Adaptada a partir de RICHARDS (1986)

### 2.1.6 Análise visual de imagens

Para JENSEN (1986) um intérprete pode discriminar aproximadamente 8 a 16 tons de cinza quando interpretando fotografias aéreas preto e branco. Se os dados são originalmente gravados em 256 tons de cinza, há muito mais informações presentes na imagem, tornando impossível a extração dessas informações visualmente.

Na análise visual de imagens a detecção, a identificação e a interpretação precedem a rotulação e a caracterização das classes de uso da terra. Os elementos da imagem a serem considerados na análise visual são a tonalidade ou cor, textura, padrão, tamanho, forma, sombra, localização e convergência de evidências. Geralmente se recorre a material complementar e trabalho de campo nas áreas teste (ESTES *et al.*, 1983).

Os dois métodos de análise visual mais utilizados são o sistemático e o das chaves. No método sistemático importa a estrutura de distribuição espacial dos elementos texturais. As chaves são legendas típicas que geralmente se referem à imagem de uma banda e podem

incluir a tonalidade, textura, padrão e forma. As classes selecionadas para a legenda deverão ser bem descritas, de modo a evitarem-se dificuldades de enquadramento (NOVO, 1989).

BELLO *et al.*, (1993) consideram ser necessárias a partir de produtos de sensoriamento remoto cinco etapas para a construção de legenda de padrões de uso do solo: a) construção de uma legenda base, que baliza o início das observações; b) organização de material complementar georeferenciado; c) estratificação preliminar, na qual se procede a busca de compreensão de padrões; d) verificação de campo; e) construção da legenda final.

TABELA 3 – EXEMPLO DE DEPENDÊNCIA DE ESCALA DAS CHAVES DE INTERPRETAÇÃO

Classe	Fotografia aérea P/B, escala 1: 30 000 (a)	Imagem TM R4G5B3 escala 1: 50 000 (b)
Mata	Textura: média a grossa Porte: alto Tonalidade: cinza médio a escuro Aspectos associados: telhado desuniforme, geralmente limites irregulares e ausência de carregadores	Textura: rugosa Cor: vermelho escuro Limite: irregular Forma: irregular
Reflorestamento	Textura: fina a média Porte: médio a alto Tonalidade: cinza médio a escuro intenso Aspectos associados: telhado uniforme, em geral limites regulares e carregadores definidos	Textura: lisa/média Cor: magenta Limite: regular Forma: geralmente geométrica
Cultura Temporária	Baixa ocorrência de carregadores, baixa subdivisão em glebas, quando as áreas cultivadas são extensas; ausência de diferentes estágios de desenvolvimento simultâneos; curvas de nível mais frequentes e evidentes dentro das glebas	
a) Cultura estabelecida	Textura: fina e contínua Porte: rasteiro ou baixo Tonalidade: cinza-claro ou médio	Textura: lisa/ média Cor: diversas Limite: regular Forma: geralmente geométrica

FONTE: a) SANTOS *et al.* (1981)

b) PEREIRA NETO (1994)

Os elementos texturais de imagem têm valores diferentes consoante a banda de operação de um sensor, a cobertura do terreno, sua topografia e as condições de imageamento. Os elementos mais afetados pelos fatores mencionados são a tonalidade ou cor e textura. As informações obtidas a partir da tonalidade e da cor têm de serem utilizadas com cautela, sendo mais significativas para escalas menores (SANTOS *et al.*, 1981). Com efeito a definição das chaves de interpretação acha-se associada à escala e material utilizado para a interpretação visual (exemplo na tabela 3).

### 2.1.7 Análise digital de imagens

JENSEN (1986) explica que em se tratando de características espectrais, devido a grande quantidade de informações, o computador é muito mais adaptado para armazenar e manipular estas informações, tornando possível uma conclusão mais apurada e confiável sobre a interpretação da superfície terrestre.

O mesmo autor denomina o processamento digital de imagens como o conjunto de procedimentos relativos a manipulação e análise de imagens por meio de computador. Para CROSTA (1992) o objetivo do processamento digital de imagens provenientes de sensoriamento remoto é identificar, extrair, condensar e realçar informações de interesse para determinados fins, a partir de uma enorme quantidade de dados que usualmente compõem estas imagens.

Segundo PARADELLA (1989) o processamento digital de imagens envolve três procedimentos básicos: a) pré-processamento; b) realce; c) classificação. Esse autor comenta que, na fase de pré-processamento utilizam-se técnicas com rotinas que visam corrigir imperfeições causadas pelo sistema sensor. Essas rotinas incluem correções geométricas,

correção de ruídos causados pela varredura do espelho imageador, correções de linhas sem informações ou com ruído. A fase de realce, visa melhorar a qualidade das imagens para facilitar a interpretação visual e classificação de padrões e, finalmente, a fase de classificação extrai informações necessárias à análise quantitativa.

Técnicas de realce se aplicam para melhorar as condições da análise. As mais comuns podem ser agrupadas em três categorias: a) de manipulação de contraste e operações aritméticas entre bandas; b) de filtragem espacial, para redução de ruído ou realce de bordas ou feições de alta frequência; c) de rotação de imagens, visando a redução de dimensionalidade e decorrelação entre bandas (NOVO, 1989; CROSTA, 1992).

Alguns exemplos de tais técnicas são:

a) aumento linear de contraste, por transformações lineares que alteram os histogramas; diferença e razão de bandas realçam diferenças e adição e multiplicação de bandas realçam similaridades;

b) filtragens passa baixa e por convolução, para redução de ruído, sendo o de mediana o que melhor preserva as bordas (RICHARDS, 1986); filtragens passa alta que realçam as bordas; filtragens direcionais, para realce de feições orientadas;

c) a transformação RGB  $\rightarrow$  IHS (RGB de vermelho, verde, azul, atribuídos a bandas escolhidas, e IHS de intensidade, matiz e saturação), para tornar mais fácil a manipulação para remoção da correlação entre bandas e também aplicada na fusão de imagens de sensores de características complementares; transformação por componentes principais, ou decorrelação (RICHARDS, 1986; CROSTA, 1992).

A classificação multiespectral também é importante recurso da análise digital de imagens. Dois procedimentos genéricos tem sido desenvolvidos neste domínio: aquele que considera o reconhecimento de padrões um problema estatístico e usa métodos da teoria da

decisão; e aquele que considera que o reconhecimento de padrões não é apenas um problema estatístico, propondo o uso de modelos contextuais, que associam critérios de localização espacial com critérios estatísticos. Quando as imagens são realçadas antes da classificação, ambas as abordagens fornecem resultados similares; em caso contrário, obtêm-se melhores resultados com os classificadores contextuais (FERREIRA JR. *et al.*, 1994), os quais ainda estão em desenvolvimento.

Na classificação multiespectral, os métodos estatísticos são ainda mais usados (ESTES *et.al.*, 1983). A classificação pode ser supervisionada ou não supervisionada, conforme incluam ou não uma fase de treinamento feita pelo usuário (LILLESAND e KIEFER, 1987).

Através da aplicação de técnicas de classificação, é possível estimar a probabilidade de um pixel pertencer a uma classe cujo comportamento espectral é conhecido através de amostras (classificação supervisionada) ou suposto (classificação não supervisionada). Entre os classificadores, destacam-se os de máxima verosimilhança, paralelepípedos e distâncias estatísticas.

Na classificação não-supervisionada, interessa distinguir a simples reclassificação ou fatiamento segundo regras estabelecidas pelo usuário e o agrupamento, que se baseia num treinamento automático a partir de algumas condições fornecidas pelo usuário. O fatiamento pode também ser utilizado para determinar o valor limite (superior ou inferior) dos pixels que se pretende classificar (RICHARDS, 1986).

#### 2.1.8 Correção geométrica

Para proporcionar propriedades cartográficas às imagens digitais é necessário que a mesma seja corrigida segundo um sistema de coordenadas pré-determinado e conhecido. O

processo que possibilita que a imagem possua escala e sistema de projeção cartográfica, denomina-se retificação ou correção geométrica.

A correção geométrica não procede necessariamente a definição de algumas características do uso da terra, mas torna mais viável a sua quantificação e comparação com imagens ou dados obtidos por outras plataformas ou expressos em outras bases cartográficas. O processo de correção geométrica, geralmente associado ao registro, segundo CROSTA (1992), envolve: a) a determinação da relação entre o sistema de coordenadas da imagem e de uma representação cartográfica conveniente e b) aplicação de transformações que associem pontos correspondentes da imagem e da referência (mapa ou imagem). O método mais utilizado de se efetuar a correção geométrica é através de pontos de controle (MATHER, 1987; EASTMAN, 1993). Para isso se procede a uma reamostragem por interpolação, em que se associa um ponto da imagem de referência a outro, da imagem a corrigir. O interpolador é basicamente, um filtro passa-baixa (MATHER, 1987). Aquele que melhor preserva a qualidade radiométrica da imagem é o do vizinho mais próximo.

O grau do polinômio de mapeamento a adotar varia geralmente com as características topográficas do terreno. Para áreas de relevo plano utiliza-se geralmente o polinômio de primeiro grau. Para áreas com relevo variado é conveniente a utilização do polinômio de segundo grau. Na detecção automática de mudanças, os erros de registro devem ser inferiores a 1,7 pixels (GREEN *et al* 1994).

Para SHOWENGERDT (1983) é necessário mudar as propriedades geométricas de uma imagem digital, como, por exemplo para o sistema de coordenadas espacial, visando corrigir os erros posicionais dos pixels ou para realizar registro de imagem com imagem ou imagem com mapa. Registros de imagem com imagem são necessários para formar mosaicos,

mapas de mudanças temporais, comparação de imagens de diferentes sensores ou combinações de imagens multiespectrais em combinações coloridas.

De acordo com RICHARDS (1993), há duas técnicas que são usadas para corrigir distorções geométricas. Uma das técnicas é usada quando são bem caracterizadas as fontes de distorções, e para tanto são desenvolvidos modelos matemáticos para se determinar fórmulas de correção. A segunda técnica depende de relações matemáticas entre as coordenadas dos *pixels* na imagem e as coordenadas desses pontos no terreno, através de um mapa.

Uma das formas de calcular a correção geométrica (relação entre dois sistemas de coordenadas mapa e imagem) é através da definição de pontos de controle no terreno, que tem que ser reconhecíveis tanto no mapa como na imagem.

RICHARDS (1993) comenta que após uma imagem ser corrigida geometricamente ela pode ser registrada no sistema de coordenadas de um mapa e então seus *pixels* ajustados nas coordenadas deste mapa.

## 2.2 Técnicas de detecção de mudanças

O sensoriamento remoto orbital tem uma participação decisiva no levantamento de informações ambientais. Por ser concebido para a detecção e mapeamento de diversos aspectos da superfície terrestre é bastante indicado para a análise ambiental de uma região. Sua repetitividade permite uma definição segura dos eixos de expansão e da velocidade de degradação ou recomposição ambiental de uma determinada área (VALERIANO, 1987).

Para MEDEIROS (1987), detecção de alteração é definida como o reconhecimento de modificações ocorridas através do tempo sobre a superfície terrestre. Estas alterações podem

ser detectadas através das técnicas de análise visual e ou digital, utilizando dados obtidos em épocas diferentes (dados multitemporais) pelos sistemas de sensoriamento remoto.

As técnicas visuais consistem simplesmente em comparar várias imagens de passagens diferentes, interpretando e mapeando as áreas onde ocorrem alterações. Porém, segundo SHEPARD (1964), uma comparação visual pode ser lenta, cansativa e sendo subjetiva pode proporcionar vários erros. JENSEN (1986) afirma que estas são algumas das razões pelas quais o método digital é muito usado para correlacionar e comparar imagens de diferentes épocas para a identificação de mudanças no uso da terra.

Com relação às técnicas digitais, segundo GREEN *et al.* (1994), a análise multitemporal de imagens de satélite é eficaz justamente porque há uma alta correlação entre a variação espectral na imagem com a mudança da superfície terrestre.

De acordo com JENSEN (1986), um método de detecção de alteração deve ser baseado em um sistema sensor que:

- a) tenha um período sistemático entre órbitas;
- b) possua registro de imagens da mesma área geográfica na mesma hora do dia, para minimizar os efeitos do ângulo de incidência solar;
- c) mantenha a mesma escala e mesmo ângulo geométrico de visada;
- d) redução do deslocamento do relevo o máximo possível;
- e) registro do fluxo radiante refletido em uma consistente e proveitosa região espectral.

Segundo JENSEN (1986), as várias técnicas de detecção de mudanças desenvolvidas com o uso de imagens digitais são agrupadas em cinco modalidades: razão entre bandas, diferença entre bandas, análise dos componentes principais, classificação espectral temporal e comparação de classificações individuais.

A escolha de determinada técnica pelo analista depende de vários fatores, como conhecimento das características biofísicas e culturais da área de estudo, precisão com que as imagens temporais são registradas e grau de flexibilidade do algoritmo a ser usado na detecção de mudanças (SOARES e HOFFER, 1996).

Segundo BYRNE *et al.* (1980) e GREEN *et al.* (1994), os mapas e imagens para a mesma região e em datas diferentes podem variar por três motivos principais: a) diferentes sistemas de classificação; b) diferentes técnicas cartográficas; c) diferenças reais no estado de superfície, supondo-se ter havido correção para diferenças nas condições atmosféricas e nos procedimentos de calibração dos sensores.

Para GREEN *et al.* (1994), as técnicas de detecção de mudanças variam com os objetivos, podendo-se distinguir-se entre a) técnicas para tornar possível a detecção; b) técnicas para medir mudanças; c) técnicas para atualização; d) técnicas para estimar mudanças em condições econômicas, políticas, etc. Para estes autores, todas as técnicas de detecção de mudanças do uso e cobertura vegetal do terreno por sensoriamento remoto baseiam-se na hipótese de que há uma correspondência, verificada por STAUFFER e MCKINNEY (1978), entre variações espectrais e tais mudanças.

Para CARRILHO (1996), o procedimento geral de análise consiste de dois passos: 1º passo de comparação de representações espaciais – mapas ou imagens de sensores remotos – de um ponto em dois tempos, ajustadas em relação às variáveis que não interessam (variações nos parâmetros orbitais e de altitude, na intercalação de sensores, variações sazonais); e 2º passo de medição da mudança causada por diferenças na variável de interesse.

JENSEN (1986) enfatiza a importância de cuidadoso registro antes da aplicação de técnicas de comparação de imagens, pois diferenças no registro de duas imagens podem levar a conclusões errôneas.

A escala temporal utilizada é de grande importância na interpretação das mudanças. Nas comparações interanuais, pode-se optar por análise de pares de datas ou análise de séries temporais longas (EASTMAN e FULK, 1993; EASTMAN, 1995).

JENSEN (1986) recomenda que, em estudos sobre mudanças de uso da terra, se comparem imagens com intervalo de 5 a 7 anos. Este período pode variar; porém, ao se reduzir o período poder-se-á, eventualmente necessitar de uma maior resolução espacial porque as mudanças em termos espaciais podem ser pequenas dependendo do tipo de atividade analisada.

As técnicas mais utilizadas para a detecção de mudanças são as anteriormente citadas. Estas técnicas podem ser utilizadas de modo complementar; pode-se iniciar com uma razão de bandas de imagens de cada uma das datas, para realçar diferenças de cobertura numa mesma data (CROSTA, 1992).

### 2.2.1 Método da diferença de bandas

A subtração entre imagens, sejam elas diferentes bandas de uma mesma imagem ou a mesma banda de diferentes imagens, serve para realçar pequenas diferenças espectrais, refletidas por diferenças em DN's (números digitais). A diferença entre bandas é bastante útil na identificação de diferenças sutis em comportamento espectral de determinados alvos em imagens multiespectrais (CROSTA, 1992).

Para CROSTA (1992), a subtração de bandas é bastante útil na identificação de diferentes tipos de cobertura vegetal, quantidade de vegetação presente e detecção de padrões de mudança da cobertura em imagens.

De acordo com GREEN *et al.* (1994), o método das diferenças simples permite detectar com alta precisão a perda de vegetação de grande porte, mas perde força quando existem diferenças em sombreamento, resultante, por exemplo, de variações nas condições de iluminação, ou quando se trata de detectar mudanças em áreas de vegetação rasteira havendo diferentes condições de umidade do solo. Pode-se, então, aplicar o método das diferenças sobre valores transformados dos níveis de cinza originais.

A diferença de bandas expressa-se da seguinte forma (STAUFFER e MCKINNEY, 1987):

$$\Delta X_{ijk} = X_{(1)ijk} - X_{(2)ijk} + C$$

onde:

$\Delta X_{ij}$  = diferença entre os valores de níveis de cinza nos pixels de linha  $i$  e coluna  $j$  das datas 2 e 1, na banda  $K$ , da cena  $X$ ;

$X_{(1)}$  = valores de níveis de cinza da imagem da cena na data 1;

$X_{(2)}$  = valores de níveis de cinza da imagem da cena na data 2; e

$C$  = constante ( $2^6$ ,  $2^7$ , ou  $2^8$ ).

Segundo CROSTA (1992), a subtração entre imagens, sejam elas diferentes bandas de uma mesma imagem ou a mesma banda de diferentes imagens, serve para realçar pequenas diferenças espectrais, refletidas por diferenças em DN's (números digitais). Da mesma forma que a adição, a subtração representa também uma operação linear, cujos resultados vão produzir intensidades fora do intervalo 0-255 (na realidade, o intervalo neste caso é de - 255 a + 255), necessitando portanto de um ajuste de contraste. Esse ajuste é implementado adicionando-se 255 ao resultado, o que vai produzir um novo intervalo 0 - 510, e dividindo-se este por 2, retornando portanto ao intervalo 0-255.

Tendo em conta o comportamento espectral de alvos, e utilizando o método da diferença, um pixel mais claro numa região de floresta indicará que a área representada pelo pixel foi desflorestada (CARRILHO, 1996). Todavia, segundo GREEN *et al.* (1994) é difícil relacionar a mudança de cobertura da terra com determinada mudança de uso da terra, dado que existem diferentes correlações entre as mudanças espectrais e as mudanças de uso da terra. Algumas mudanças de uso da terra podem não acarretar mudança espectral detectável dentro de margens de precisão desejadas. Além disso, o uso de mapas para a detecção de mudanças através da subtração não é sempre desejável porque a diferença de cobertura da terra entre mapas é frequentemente resultado de diferentes métodos de confecção dos mapas e não de mudanças.

Para imagens-diferença, a definição do limiar de classificação tem sido bastante estudada .

Segundo JENSEN (1986), a definição do limiar pode ser empírica, por tentativas, ou por método estatístico, a partir da variância dentro da cena em passagens consecutivas do satélite.

Os pixels com intensidade próximas da média, identificam áreas onde não ocorreu mudanças. As áreas de mudança para cada banda são determinadas na imagem diferença pela identificação dos pixels cujos valores estejam acima ou abaixo de um valor de corte ou limiar calculado.

STAUFFER e MCKINNEY (1978) em seu exercício estabeleceram que a mudança é representada pelos pixels com valores de cinza além de três desvios padrões. Limiares inferiores a 2 desvios padrões parecem superestimar a quantidade de mudanças. Para a banda MSS7 (0,8 a 1,1  $\mu\text{m}$ ), NELSON (1982) encontrou valores entre 0,35 e 0,60 do desvio padrão.

Os valores resultantes de modelagem do mesmo autor foram, respectivamente, 0,55 e 0,60 do desvio padrão. EASTMAN (1995) recomenda valores da ordem de 1 desvio padrão estimado.

A interpretação de mudanças ocorridas depende da sua natureza, do método utilizado para detectá-las e da escala temporal utilizada. Pode fazer-se comparações intra-anuais, para detectar diferenças sazonais no uso da terra (RUDORFF e TARDIN, 1988), ou interanuais, para detectar a intensidade de uso da terra ou a expansão de diferentes atividades relacionadas ao uso da terra e da sazonalidade da região.

O histograma da imagem diferença será do tipo indicado na figura 5, com média definida.

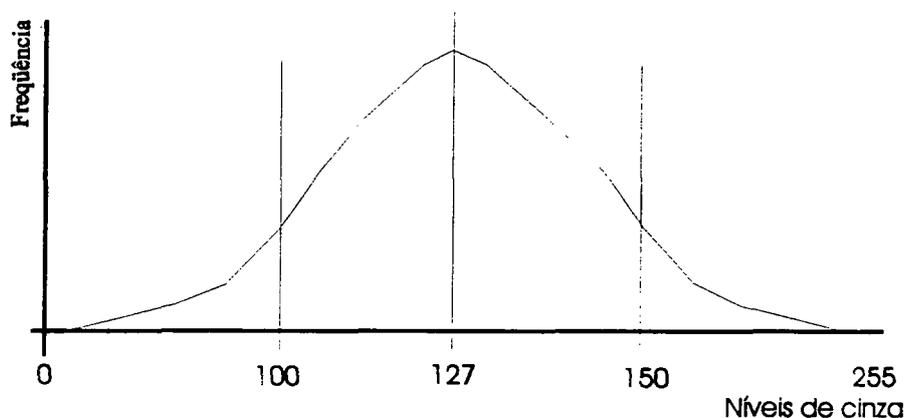


FIGURA 5 – HISTOGRAMA DE UMA IMAGEM DIFERENÇA. ENTRE OS NÍVEIS DE CINZA DE 100 A 150 ESTÃO OS PIXELS DE ÁREAS SEM MUDANÇAS

NELSON (1982), concluiu que a diferença de razões teve melhor desempenho do que a diferença simples na detecção de alteração da vegetação por ataque de pragas.

GREEN *et al.* (1994) aplicaram a diferença a um índice vegetativo construído pela razão entre valores de reflectância nas bandas TM3 (V3) e TM4 (V4). Usaram a seguinte expressão:

$$\Delta_{ij} = 198 \cdot [(V3_{ij}(t2) / V4_{ij}(t2)) - (V3_{ij}(t1) / V4_{ij}(t1))] + 100$$

onde:

$\Delta_{ij}$  = valor da diferença de índices no pixel de linha  $i$  e coluna  $j$  ;

$(V3_{ij}(t2) / V4_{ij}(t2))$  = valor do índice no pixel  $ij$  na data 2;

$(V3_{ij}(t1) / V4_{ij}(t1))$  = valor do índice no pixel  $ij$  na data 1; e

198 e 100 = constantes, escolhidas em função da imagem.

Os autores concluíram que esta diferença apenas compensou os efeitos de sombreamento e diferenças nos níveis de água. CHAVEZ e MACKINNON (1994) apresentaram objeções à utilização do índice vegetativo de diferença normalizada (NDVI) como método de detecção de mudanças em regiões semi-áridas, porque na banda do infravermelho próximo, é pequena a diferença entre a reflectância devida aos solos e a reflectância devida à vegetação quando ela brota. Esta situação pode ser também encontrada quando se pratica irrigação. Para contornar este problema, sugerem o uso da banda vermelha, do visível, em substituição ao NDVI.

VOEGELMANN e ROCK (1986), utilizando a técnica de razão de bandas com o simulador de mapeador temático NS-100 para avaliar danos em florestas de *Pinus* nas montanhas de Vermont – USA, mostraram que a razão de bandas 7/banda 4 foi a mais precisa para mapear e quantificar níveis de danos nas florestas de *pinus*. Ao utilizar três técnicas de detecção de mudanças (diferença entre bandas, razão entre bandas e diferença de índice vegetativo, NELSON (1983)<sup>2</sup> citado por SOARES e HOEFFER (1996), verificou que a técnica de diferença de índice vegetativo, seguida pela razão banda 5/banda5, foi a mais eficiente para delinear mudanças florestais causadas por insetos. Um estudo acerca do

---

<sup>2</sup> NELSON, R. F. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 49, n.9, p. 1243-1251, 1994.

monitoramento da desfoliação em áreas florestais conduzido por MUCHONEY e HAAK (1994) indicou que das quatro técnicas testadas, ou seja, análise dos componentes principais, diferença entre bandas, classificação espectral /temporal e comparação entre classificações individuais, as duas primeiras foram as mais efetivas. SOARES (1994), ao avaliar mudanças em plantações de *Eucalyptus spp.* no Vale do Rio Doce – MG, constatou que técnicas de diferença entre bandas e classificação espectral/temporal foram superiores às razões entre bandas e da análise dos componentes principais e ao índice de vegetação da diferença normalizada para avaliar mudanças em plantações de *Eucalyptus spp* e outras coberturas.

### 2.2.2 Método de Componentes principais

A análise de componentes principais é comumente utilizada em análise de dados oriundos de sensores remotos. Imagens produzidas por sensores do tipo “scanners” possuem um alto grau de correlação entre as suas bandas multiespectrais. Isto quer dizer que dada a intensidade de um determinado pixel em uma delas, pode-se deduzir com razoável aproximação a intensidade do pixel correspondente na outra imagem, causando uma certa redundância de dados e um certo desperdício na manipulação, processamento e armazenamento de dados. A principal função da análise de componentes principais (APC) é determinar a extensão dessa correlação e removê-la através de uma transformação matemática adequada (CROSTA, 1992).

De acordo com LILESAND e KIEFER (1987), quando essa técnica é empregada antes do processamento digital das imagens, ela geralmente, aumenta a eficiência computacional dos processos de classificação pelo fato de propiciar a redução na dimensionalidade dos dados. O propósito fundamental da utilização dessa técnica é comprimir a informação contida

no conjunto original das  $n$  bandas do sensor em um número menor de bandas ou componentes.

Diferentemente das razões entre bandas que requerem uma cuidadosa escolha das combinações de bandas a fim de enfatizar características espectrais específicas, a transformação em componentes principais não requer informação *a priori* e, dessa forma, pode ser aplicada de maneira menos direcionada. Ela é normalmente aplicada a todas as bandas disponíveis do sensor com o qual se está trabalhando. As imagens resultantes enfatizam distinções entre os diferentes materiais existentes na superfície, mas, em virtude do fato de cada nova imagem ser uma combinação linear de todas as bandas consideradas, as componentes, individualmente, ou por meio de composições feitas com as mesmas, não podem ser interpretadas da mesma maneira que se faria com o produto resultante da razão de bandas (WILLIAMS JR., 1983).

Ao se estudarem as mudanças de uso do terreno entre duas datas pelo método de componentes principais, pode-se proceder à transformação das imagens de cada uma das datas, comparando resultados, ou, alternativamente, pode-se proceder à transformação considerando o conjunto de todas as bandas de ambas as datas. Para a análise de mudanças específicas, como a expansão de áreas de mineração pode-se selecionar apenas aquelas bandas mais relevantes. Trata-se da análise por componentes principais seletivas (CHAVEZ e MACKINNON, 1994).

Para CARRILHO (1996) quando duas imagens multiespectrais de datas diferentes e da mesma cena são comparadas, em geral há uma grande correlação entre as bandas correspondentes. Isso significa que, a partir das informações contidas numa das imagens, é possível inferirem-se as informações contidas na outra. A análise de ocorrência de mudanças na superfície imageada torna-se mais simples quando a correlação entre as imagens é mínima.

Quando a partir dessas imagens, se representam graficamente os níveis de cinza correspondentes num sistema de coordenadas ortogonais, obter-se-á uma nuvem de pontos (“*scatter plot*”). A correlação fica expressa pelo fato de tal nuvem apresentar uma orientação que não é paralela a nenhum dos eixos coordenados. Se a correlação fosse perfeita, todos os pontos se localizariam numa reta – a reta de regressão entre as duas imagens. Mas, por vários motivos, entre os quais as condições de iluminação e visada, as variações de desempenho do sensor e as mudanças que realmente ocorreram nas áreas de mineração, a correlação não é perfeita.

De acordo com CHAVEZ JUNIOR (1989), a análise de componentes principais constitui-se de transformações matemáticas que irão gerar novas imagens chamadas de componentes ou eixos, que são combinações lineares das imagens originais. Esta análise gera um novo grupo de eixos rotativos ortogonais entre si, sendo que as novas imagens não terão nenhuma correlação entre si. A variância total é apresentada na primeira componente, diminuindo gradativamente nas demais, e a soma das variâncias em todas as componentes é igual ao total da variância presente nas imagens originais. Usualmente é comum que a primeira componente contenha algo em torno de 90% da variância total do conjunto, enquanto a segunda responde por algo em torno de 5% deste total.

A transformação por componentes principais (também conhecida como transformação de Karhunen-Loève), tem em vista eliminar a correlação entre bandas e seu objetivo é conseguir um novo conjunto de imagens cuja matriz de covariância seja diagonal ( $\Lambda$ ), isto é, todos os elementos não diagonais são iguais a zero, através da criação de um novo sistema de referência (CARRILHO, 1996).

FREY (1994), expressa tal transformação da seguinte forma: seja dada uma imagem, de  $p$  bandas, definida como  $g: S \rightarrow \mathbb{R}^p$ , cuja matriz de covariância (ou de correlação) é  $\Sigma_g$ , não

diagonal. A imagem de  $j$  componentes principais, cuja matriz de covariância (ou de correlação) é  $\Sigma_n = \Lambda$ , tal que  $A^T \Sigma_g A = \Lambda$ , sendo  $A = (\alpha_{ij})$  a matriz de autovetores, será  $h: \tilde{S} \rightarrow \bar{R}^2$  dada por:

$$H_j(s) = \sum_{i=1}^p \alpha_{ij} g_i(s); \forall 1 \leq j \leq p; \forall s \in S$$

CARRILHO (1996) fala que a matriz de correlação, em vez da matriz de covariância, pode ser utilizada quando se queira atribuir peso igual a todas as bandas. A transformação preserva o valor total da variância: a soma dos elementos da diagonal da matriz de covariância é igual a soma de autovalores, dados em unidades de variância.

As variâncias associadas a cada uma das principais componentes são chamadas de autovalores, raízes características, raízes latentes ou valores próprios (AFIFI e CLARK, 1990).

A cada autovalor corresponde um autovetor. Os autovalores são ordenados em ordem decrescente. O ordenamento dos autovetores depende da ordem obtida com os autovalores. A primeira componente principal está relacionada com o primeiro autovalor, e assim sucessivamente.

Ao se trabalhar com duas bandas apenas (por exemplo a banda 1 = TM3 de 1987 e a banda 2 = TM3 de 1996), tem-se :

$$1^a \text{ CP} = \alpha_{11} \cdot g_{\text{banda 1}} + \alpha_{21} \cdot g_{\text{banda 2}}$$

$$2^a \text{ CP} = \alpha_{12} \cdot g_{\text{banda 1}} + \alpha_{22} \cdot g_{\text{banda 2}}$$

As componentes principais de um conjunto de bandas são combinações lineares de tais bandas, cujos coeficientes são os autovetores correspondentes. Os valores dos pixels das bandas originais são convertidos em escores, que têm um significado físico que permite identificar uma classe de cobertura do terreno.

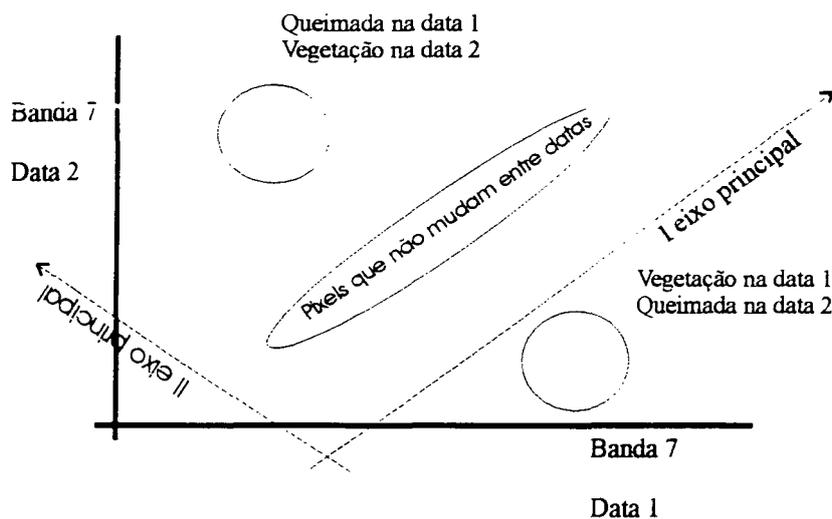


FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO HIPOTÉTICA DA DISPERSÃO DE PIXELS ASSOCIADOS A COBERTURAS DA TERRA CONSTANTES E OS EIXOS DAS COMPONENTES PRINCIPAIS.

FONTE: adaptada a partir de RICHARDS (1986)

Esta operação representa uma rotação de um sistema de eixos ortogonais. Os autovalores representam, geometricamente, a direção, a orientação e a escala dos novos eixos coordenados ortogonais, sendo o primeiro orientado ao longo da linha de maior variância. Os autovalores representam, geometricamente, a dimensão da nuvem de pontos ao longo dos autovetores correspondentes e são numericamente iguais à variância dos escores da respectiva componente principal. O conjunto de autovetores e autovalores é conhecido como autoestrutura.

As componentes principais de ordem mais elevada, isto é, as de menor autovalor, contêm informação sobre as mudanças de cobertura da terra e as primeiras componentes (figura 6) tendem a representar a cobertura inalterada e sua ausência (BYRNE *et al.*, 1980; RICHARDS, 1986; EASTMAN e FULK, 1993).

BYRNE *et al.* (1980) em exercício com imagens do sensor MSS Landsat, a primeira componente principal reflete o relevo e a dissecação do terreno, e está associada à variação de brilho nas bandas do infravermelho, a segunda componente principal está associada à variação de brilho nas bandas do visível, e a terceira e quarta componentes são as que contém informação sobre as mudanças. Nestas componentes, as áreas não alteradas aparecem em cinza médio.

WHEATE e FRANKLIN (1987) verificaram que a análise de componentes principais de dados multiespectral em regiões montanhosas pode fornecer um significado mais efetivo da discriminação e classificação, em combinação com ou sem um modelo de elevação digital. Além disso, as imagens criadas novamente podem ser usadas para identificar melhor certos tipos de características de superfície. Enquanto, PC1 explica cerca de 70% da variação da cena, o PC2 pode ser mais útil em análises de geleiras e regiões com precipitações de neve, como o PC3 para vegetação e a hidrologia e o PC4 para a umidade do solo. A última componente principal indica algum potencial para a banda infravermelha termal. Portanto, estudos são necessários para o exame completo da correlação entre os componentes e as características do relevo.

FUNG e LEDREW (1987) examinaram o efeito do uso de diferentes tipos de matrizes para a transformação de componentes principais, com ênfase especial na sua aplicação em detecção de mudança na cobertura do solo da região de Kitchener-Waterloo-Guelph, Ontário, Canadá. Verificaram que os componentes principais padronizados são mais precisos do que os não padronizados, devido seu melhor alinhamento ao longo das mudanças em áreas cobertas na estrutura de dados multi-temporais. Estatísticas obtidas da área de estudo total foram melhor e mais seguras do que as obtidas de áreas contendo todos os elementos de um determinado conjunto ou subconjunto. Concluíram que a análise dos componentes principais

é dependente da cena e o uso desta técnica exige uma cautelosa avaliação das autoestruturas e imagens dos componentes principais.

A análise de componentes principais tem a característica de preservar a variância total da transformação dos dados e minimizar segundo LEE *et al.* (1990) o quadrado dos erros médios aproximados, sendo uma técnica atrativa para a redução da dimensionalidade dos dados e deve ser usada somente com um bom conhecimento da área de estudo, para evitar conclusões errôneas. Deste modo, a detecção, deve ser seguida por uma classificação supervisionada ou não supervisionada, mas o significado das mudanças só pode ser compreendido com conhecimento da área de estudo. Aborda-se o problema fazendo uma classificação sobre a imagem que representa as mudanças, montando-se uma chave de interpretação ou procedendo-se uma classificação, quer supervisionada quer não supervisionada. Ao optar por classificação digital, interessa escolher cuidadosamente as componentes a serem processadas. RICHARDS (1986) apresenta um exemplo em área com algum relevo, para estudo de áreas de queimada, em que apenas usou a terceira e quarta componentes principais na classificação não supervisionada das mudanças ocorridas na cobertura do terreno.

Para CARRILHO (1996), uma das formas de contornar as dificuldades que se referem aos exemplos anteriores é a utilização de apenas duas componentes principais de imagens de uma só banda de duas datas diferentes. Nesse caso, a seleção da banda ou bandas é feita em função dos objetivos pretendidos. A segunda componente principal contém a informação que não é comum às duas imagens. Ao se trabalhar com duas imagens monoespectrais da mesma banda (por exemplo, a banda TM5), a segunda componente principal contém informação sobre as mudanças nas feições que tal banda melhor discrimina (por exemplo conteúdo de

água do solo). Esta técnica elimina a maior parte das diferenças de baixas frequências do conjunto da imagem, realizando automaticamente uma calibração relativa entre as imagens.

JIAJU (1988) afirma que a classificação de culturas agrícolas com base nas segundas componentes principais de bandas não calibradas oferece resultados satisfatórios. Todavia, em relação a dados calibrados, verificou existirem algumas diferenças nos autovetores das segundas componentes principais das bandas TM2, TM3 e TM4.

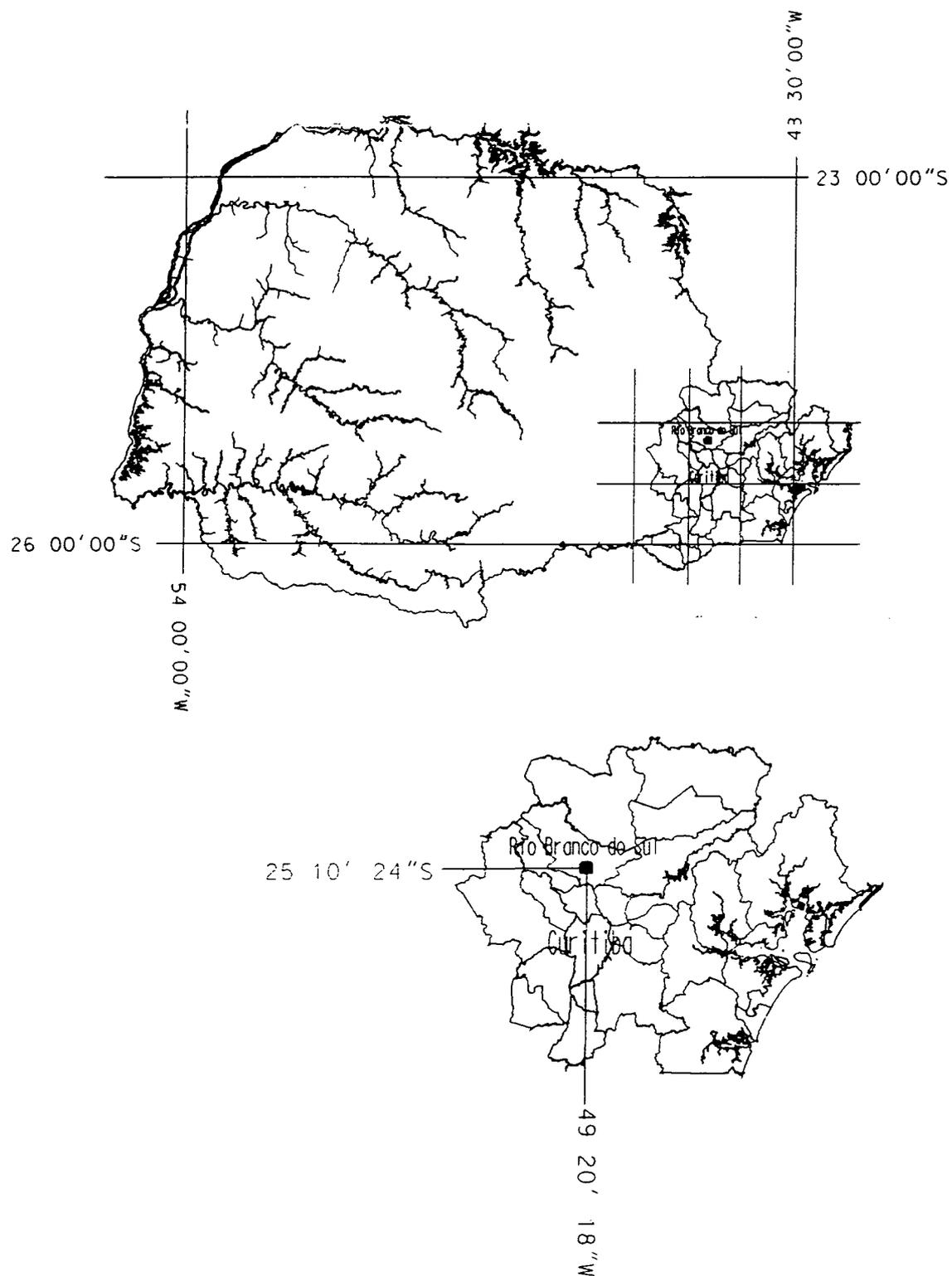
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é uma das minas de calcário calcítico pertencente a companhia Portland Rio Branco do grupo Votorantin, denominada Saivá e localiza-se no primeiro planalto paranaense, no município de Rio Branco do Sul.

A detecção da expansão de mineração foi executada somente numa poligonal de entorno à mina delimitada por um polígono envolvente de 263 ha. As coordenadas centrais da área são  $25^{\circ} 10' 24''\text{S}$  e  $49^{\circ} 20' 18''\text{W}$ , conforme ilustrado na figura 7.

Para a escolha da mina estudada, selecionou-se uma que fosse representativa do que acontece em termos de exploração de calcário calcítico para confecção de cimento na região metropolitana de Curitiba e na possibilidade de detecção de possíveis mudanças que pudessem ocorrer na referida área, e de serem detectadas por imagens TM Landsat. Assim, a área selecionada refere-se a uma mina com dimensão atual relativamente grande, 60 ha de mina (frente de lavra) e 54 ha de depósitos de rejeitos antigos e recentes (bota fora).



**FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO E COORDENADAS CENTRAIS DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE RIO BRANCO DO SUL**

### 3.1.2 Geologia e geomorfologia

No trabalho Geografia Física do Estado do Paraná, MAACK (1981) dividiu o estado em cinco grandes regiões, “zonas de paisagem natural” ou regiões geográficas naturais.

A área de estudo está inserida no primeiro planalto paranaense que é limitado a leste pela serra do mar e a oeste pela escarpa devoniana. Apresenta uma fisionomia não homogênea em sua extensão, subdividindo-se em três sub-regiões: O planalto de Curitiba, a zona montanhosa do Açungui e o planalto do Maracaná (MAACK, 1981).

Os divisores de água que delimitam as bacias dos rios Iguaçu e Ribeira são constituídos de rochas metamórficas, com intrusões de granitos e diabásios. O relevo apresenta-se bastante movimentado, com vales profundos em forma de “v” e espigões alongados, podendo ser considerado, de modo geral, um relevo montanhoso tipo apalacheano.

Apesar da aparente complexidade morfológica, o primeiro planalto mantém certa homogeneidade marcada pela sucessão de longas cristas quartzíticas, separadas por profundos vales. Perpendicular ou obliquamente, as cristas e vales são atravessados por outras direções do relevo, relacionadas a diques de diabásio. Na paisagem, dependendo da rocha encaixante, o dique pode apresentar-se como linhas de crista ou de vales.

A drenagem apresenta-se do tipo retangular em muitos setores do primeiro planalto, obedecendo a um condicionamento tectônico, por direções de camadas, fálhas e diáclases. Os rios têm caráter subseqüente ou direcional e secundariamente conseqüente. São freqüentes os rios superimpostos, cujos vestígios são encontrados nos “boqueirões” (SALAMUNI e BIGARELLA, 1967).

No modelado paranaense foram reconhecidos vestígios de três grandes superfícies de erosão, as quais apresentam-se muito bem aplainadas. Os chamados pediplanos são remanescentes da superfície mais antiga tectonicamente deformada, encontrados na periferia

do primeiro planalto, na Serra do Purunã e na Serra do Mar. Na região norte do Planalto de Curitiba, os remanescentes desta superfície encontram-se consideravelmente rebaixados, sobressaindo-se como inselbergs residuais acima dos dois pediplanos mais recentes. O pediplano intermediário possui igualmente distribuição fragmentária, porém mais extensa do que a superfície mais antiga. Embutidos na última superfície encontram-se os dois níveis de pedimentos e dois baixos terraços de cascalho, além de rampas colúvio-aluvionares e terraços de várzea de idade mais recente (BECKER, 1982).

### 3.1.3 Solos

Os solos encontrados na região onde está inserida a área de estudo variam de acordo com a litologia, o relevo e a drenagem. Estudos elaborados pela EMBRAPA (1984) indicam ocorrer sob os filitos, predominantemente Cambissolos no relevo ondulado e solos Litólicos no relevo forte ondulado, geralmente pouco utilizados e com vegetação nativa de campos. Normalmente são solos pouco utilizados, ácidos e argilosos.

Nas regiões de ocorrência de calcário, este, muitas vezes é limitado por quartzitos e filitos. Sobre os primeiros ocorrem os Podzólicos e os Latossolos, predominantemente. Sobre os filitos dependendo do relevo, ocorrem os solos Litólicos com afloramentos nos relevos mais movimentados e os Cambissolos nos menos movimentados. Nos quartzitos predominam os afloramentos juntamente com os solos Litólicos e, nos sedimentos recentes de várzea predominam Cambissolos Gleicos e Glei Húmico dependendo da drenagem.

### 3.1.4 Clima

Conforme IPARDES (1979) o clima da região, segundo a classificação de Köppen, apresenta-se como do tipo climático *Cfb*. O tipo *Cfb* se define como: sempre úmido, clima pluvial quente temperado, com o mês mais quente com médias inferiores a 22 °C e onze meses do ano com temperaturas médias maiores que 10 °C. Está sujeito a precipitações regulares todos os meses do ano. Ocorrem geadas severas, raramente neve e não apresenta estação seca (MAACK, 1981).

### 3.1.5 Vegetação atual

A área de estudo apresenta uma fisionomia resultante da interação das características fisiográficas presentes, predominantemente aquelas relativas às condições climáticas atuais, associadas ao piso altitudinal e a pedologia (MAACK, 1981).

Essa área encontra-se sob o domínio da região fitoecológica Floresta Ombrófila Mista (ou Floresta com Araucária). A caracterização fitofisionômica da área classifica-a como sendo domínio da Floresta Ombrófila Mista, com suas subdivisões Montana e Aluvial e da Estepe Gramíneo-Lenhosa.

Pode-se afirmar que, atualmente, a região de estudo apresenta-se bastante descaracterizada em termos de vegetação, graças a ação antrópica ocorrida durante seu processo de ocupação e utilização. A cada ciclo econômico que se sucedeu, iniciando-se pelo da extração de madeiras nobres e da erva-mate, até o atual, onde predominam a agricultura em pequenas propriedades e, principalmente a grande concentração de atividade mineradora de calcário, a vegetação original foi sendo modificada, reduzindo-se a biodiversidade local, apesar do aparecimento espontâneo ou da introdução de espécies exóticas.

A paisagem outrora existente, onde os maciços de florestas com araucária alternavam-se com campos naturais e com florestas de galeria que marginavam os cursos d'água, deu origem a outra, na qual revezam-se elementos antrópicos detratores da paisagem, como chaminés e áreas de exploração mineral, pequenas propriedades intensivamente utilizadas para diversos fins, áreas cobertas por bracatingas e reflorestamentos com pinus. Há também pastagens não manejadas e áreas abandonadas, cobertas por vegetação rasteira, que tem seu processo de sucessão dificultado por fatores como poluição por poeira advinda das áreas de exploração mineral, baixos níveis de fertilidade e altos níveis de acidez do solo e distância de locais de propagação de sementes, entre outros.

A vegetação ciliar é praticamente inexistente. São pouco freqüentes os indivíduos remanescentes de araucária, quase sempre restritos às proximidades das casas, dentro das pequenas propriedades rurais, sem sub-bosque.

Atualmente, em termos de vegetação, pode-se afirmar que predominam os sistemas secundários de ocupação em estágios iniciais de sucessão, raramente ultrapassando a fase de capoeira arbórea (IBGE, 1992).

### 3.1.6 Processos de mineração de calcário

Segundo DIAS (1992), o calcário é sem dúvida o mais importante insumo mineral produzido no estado do Paraná. A contribuição relativa do calcário no valor monetário da produção mineral paranaense foi em média de 33,5% no período de 1979-1988. O mesmo autor afirma que do aproveitamento de rochas calcárias no Estado do Paraná, tem-se que 45% se destinam às indústrias cimenteiras, 45% à indústria de corretivo agrícola, 8% para a produção de cal e 2% para uso industrial.

No Estado do Paraná, as lavras para a exploração de rochas calcárias são todas a céu aberto. As frentes de lavra são embocadas em maciço rochoso ou em encosta, e os processos de extração do minério variam de mecanizados, semi-mecanizados a manuais, dependendo do porte da empresa. A preparação das frentes de lavra (mina) e expansão das mesmas inicia-se com a remoção da vegetação e do capeamento do solo, de espessura variável, com trator de esteira ou pá carregadeira, cujo material é retirado com caminhões basculantes e depositado em locais fora da frente de lavra denominados de depósitos de rejeitos (bota fora).

A expansão da área minerada dá-se pelo aumento da mina iniciando-se pela remoção da vegetação e pelo decapeamento do solo, seguido do avanço da frente de lavra e aumento horizontal ou vertical dos depósitos de rejeitos. Estes caracterizam-se por serem um amontoado de rejeitos de mineração misturados com solo, altamente instáveis e causadores de grandes danos ao meio ambiente local, principalmente pela erosão e conseqüente carreamento de sólidos em suspensão às drenagens locais.

A extração do calcário calcítico para o setor cimenteiro é processada em larga escala e totalmente mecanizada, com bancadas de 10 a 15 metros de altura, bermas com largura de 10 metros e taludes com inclinação de 70 a 90 graus, enquanto que nos calcários dolomíticos (explorados em menor escala por pequenas empresas), as frentes de lavra geralmente apresentam bancada única, cuja altura pode atingir até 60 metros em parede vertical, o que dificulta a extração e resulta em maior consumo de explosivos e decréscimo da produtividade.

Na mina estudada a produção média mensal de minério para confecção de cimento é de 320.000 toneladas para cimento mais 183.000 toneladas com teores superiores a 8% de Mg que são destinadas para produção de brita e parte é depositado em botas fora nas proximidades da frente de lavra.

Uma característica peculiar do calcário calcítico explorado para produção de cimento na região de estudo é sua coloração cinza escuro. Esta coloração afeta a curva de reflectância espectral do minério, sendo diferente da apresentada na revisão de literatura, cujo calcário estudado era caracteristicamente branco.

Na figura 8 podemos visualizar um dique de diabásio no centro da foto e nas adjacências deste está o minério explorado que tem coloração cinza escuro.

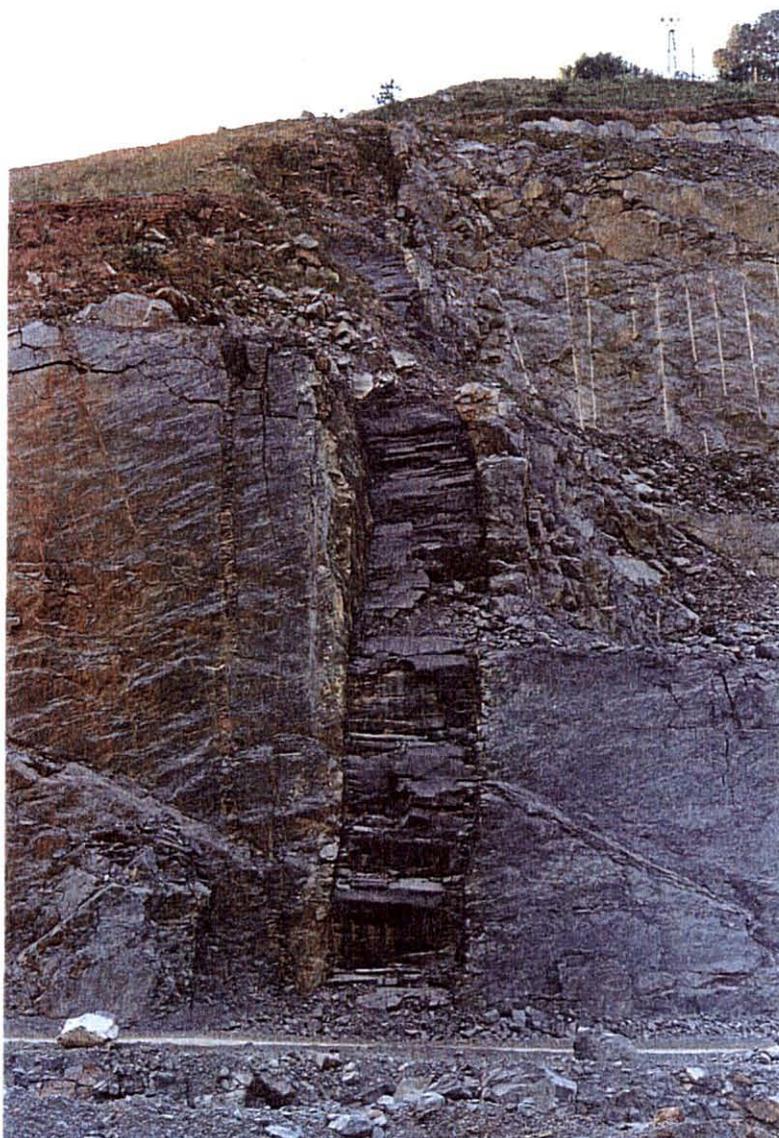


FIGURA 8 – FOTO ILUSTRATIVA DA COLORAÇÃO DO CALCÁRIO CALCÍTICO EM COMPARAÇÃO AO DIQUE DE DIABÁSIO NO CENTRO DA FOTO.

### 3.2 DADOS UTILIZADOS

Foram utilizadas imagens digitais obtidas pelo sensor TM (Thematic Mapper), a bordo do satélite Landsat 5, órbita 221 e ponto 77 (quadrante D sul), em suas passagens em 10 de outubro de 1987 e 30 de julho de 1996, observando as bandas espectrais contidas na tabela 4 com resolução radiométrica de 8 bits:

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DAS BANDAS TM

Banda	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Res. (m)
3	0,45 - 0,52	30
4	0,76 - 0,90	30
5	1,55 - 1,75	30

#### 3.2.1 Mapas

Foram utilizados mapas planialtimétricos da mina, confeccionados pela empresa proprietária na escala 1:5.000 e mapas planialtimétricos da COMEC (Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba) na escala 1:50.000 nas seguintes articulações: SG-22-X (D-I-1), SG-22-X (D-1-2), SG-22-X (D-I-3) e SG-22-X (D-I-4).

#### 3.2.2 Sistemas computacionais e equipamentos utilizados

O processamento digital das imagens de sensoriamento remoto foi realizado em microcomputador Pentium 166, com aplicativos para o tratamento de imagens, como MGE Advancer Imager, Microstation 5.0, e Corel Draw 7.0 para as outras manipulações e edição

final de imagens. A manipulação de dados de sensoriamento remoto deste projeto realizou-se no Laboratório de Sensoriamento Remoto do Curso de Engenharia Florestal da UFPR.

### 3.3 METODOLOGIA

A região, bem como a área de estudo é acidentada, predominando relevo forte ondulado a montanhoso. Segundo WHEATE e FRANKLIN (1987) a análise digital de imagens em áreas montanhosas oferece desafios que não estão presentes em áreas planas. Eles são devido a mistura da entrada de números digitais representando pixels na imagem, isto é: variação topográfica (brilho) e cobertura superficial (albedo).

Etapas de campo foram então necessárias para um perfeito reconhecimento da área de estudo e para o estabelecimento de padrões a serem utilizados na detecção e caracterização das mudanças.

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas consecutivas: a) detecção de áreas de mudança e b) caracterização e diagnóstico das mudanças. Cada uma delas foi tratada independentemente. Entretanto, a segunda etapa dependeu dos resultados intermediários obtidos com as visitas de campo e da conclusão da primeira.

#### 3.3.1 Detecção de mudança em áreas de mineração

O procedimento geral escolhido para a detecção, caracterização e diagnóstico de mudanças na área de mineração de calcário calcítico, é apresentado na figura 9.

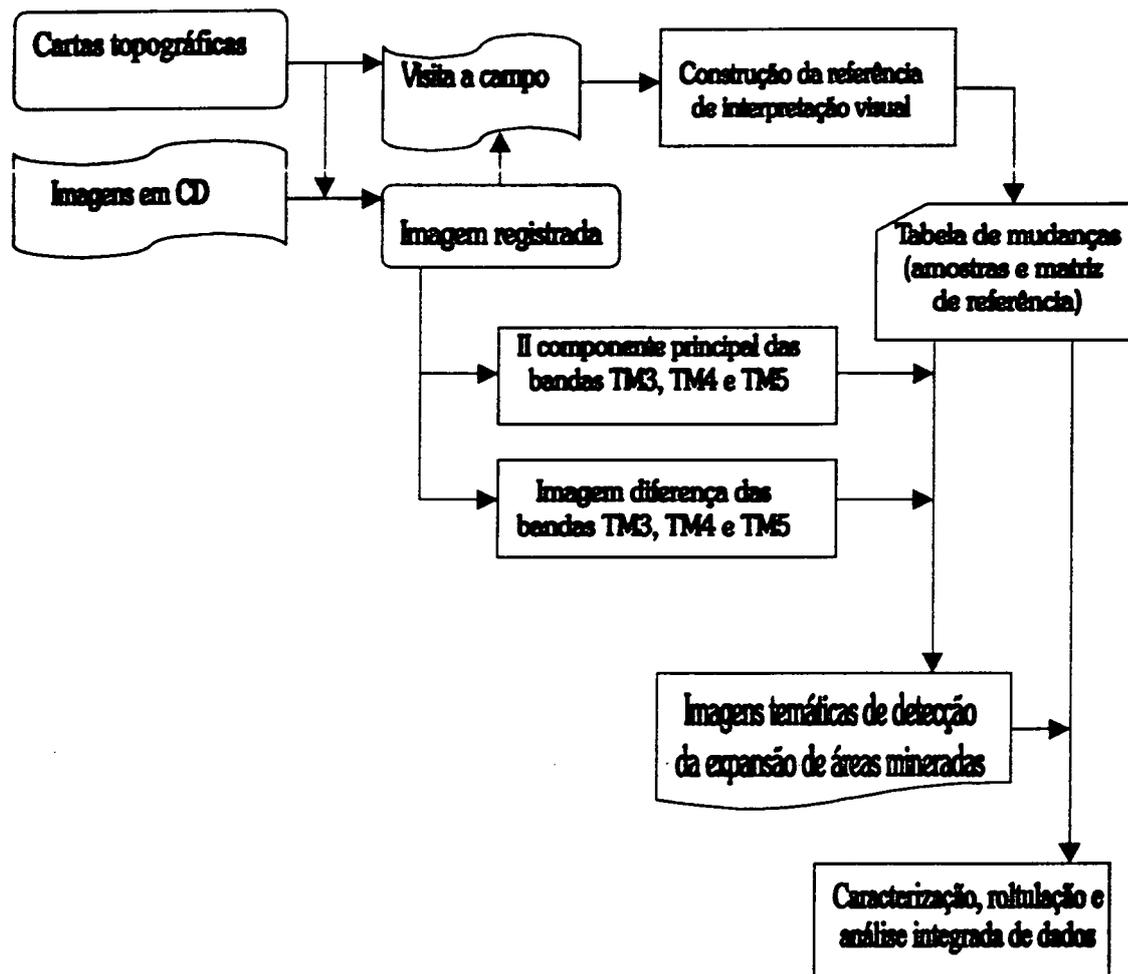


FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSÃO DE EXPLORAÇÃO MINERAL

Segundo VALERIANO (1987), são grandes os problemas de ordem metodológica envolvidos na detecção de aspectos da paisagem relacionados a extração e ao beneficiamento mineral. As grandes variações de forma, tamanho, tipo de material trabalhado e conduta operacional da atividade mineradora impedem a formulação de um modelo genérico para ser aplicado na detecção de qualquer tipo de mineração. Cada caso deve ser analisado à luz de suas peculiaridades, de modo a se contornar as limitações através da exploração de aspectos característicos da atividade mineradora.

### 3.3.1.1 Pré-processamento

O pré-processamento envolveu as etapas de leitura de dados digitais gravados em CDrom, registro de imagens e preparação de composições para visita de campo e para referência de qualidade de mapeamento.

As imagens foram recortadas originalmente com uma dimensão de 1867 colunas por 1534 linhas e corrigidas geometricamente.

O registro entre imagens, para efeitos de detecção automática de mudanças, constitui um requisito essencial. No registro imagem versus mapa para uma base digitalizada da COMEC na escala 1:50.000 o erro médio foi de 0,44 pixels, considerando uma resolução espacial de 30 m do pixel, o erro foi de 14 metros. JENSEN (1983) recomenda que o erro se situe entre  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  de pixel quando se efetua a detecção de mudanças por métodos de diferença ou razão de bandas. GREEN *et al.* (1994) admitem um erro de até 1,7 pixels no registro entre imagens.

O registro imagem versus mapa foi feito entre a imagem de 1987 e cartas à escala 1:50.000 baseadas em fotografias aéreas de 1976. O intervalo entre a aquisição da fotografia aérea para a elaboração das cartas de referência e a aquisição da imagem é de 11 anos. Por se tratar de uma região com muitas estradas e bastante habitada, a utilização de pontos de controle com características ideais, como cruzamentos de estradas e instalações fixas, foi facilitado.

Foi utilizado um polinômio de mapeamento de 2º grau que requer um mínimo de 6 pontos de controle. Recomenda-se um número de pontos 2 a 3 vezes este valor (MATHER, 1987; EASTMAN, 1995). Dessa forma, utilizou-se 35 pontos, de um total de 35 localizados, sendo o erro total para os pontos utilizados no mapeamento de 14 metros. A reamostragem utilizada foi a do vizinho mais próximo por ser o que melhor preserva a qualidade radiométrica da imagem original.

Para o registro imagem x imagem foi possível encontrar pontos confiáveis. Foram também utilizadas equações de mapeamento de 2º grau e reamostragem pelo vizinho mais próximo para preservar a qualidade radiométrica da imagem original. Para o registro entre as imagens de 1987 e 1996, foram utilizados 23 pontos, de um total de 35, o erro total para os pontos utilizados no registro foi 0,40 do pixel. Utilizou-se- nesse registro um número menor de pontos, pois entre a imagem mais recente e a mais antiga, muitos pontos não puderam ser observados devido a grande dinâmica de ocupação da área.

### 3.3.1.2 Elaboração da referência de avaliação da qualidade do mapeamento

Dois conjuntos de composições coloridas foram preparados referentes às duas épocas: o primeiro, expedito, para apoio à visita de campo e o segundo para interpretação visual utilizada como referência para a qualidade do mapeamento.

Sobre a imagem mais recente, amostrou-se pontos de referência a campo com GPS de navegação (GARMIN 38) para a construção da tabela de amostras de mudanças e interpretação visual. Nas imagens das duas datas consecutivas, cada um dos pontos amostrais (figura 9) foi interpretado visualmente e rotulado segundo uma das duas classes: 1 = mudança e 2 = não mudança.

A interpretação visual comparativa entre as imagens das duas datas para a identificação e decisão sobre a existência ou não de mudanças foi realizado com o auxílio de composições coloridas impressas nas duas datas consideradas e das imagens transformadas.

A matriz de interpretação utilizada para referência baseou-se nos resultados do preenchimento de uma ficha de trabalho após visita à campo. As classes consideradas foram 1 para pontos onde se verificou mudança e 2 para os pontos onde não se verificou mudança no uso do terreno.

Para efeito de análise, seis classes de mudança e duas de não-mudança foram definidas, sendo apresentadas na tabela 5.

TABELA 5 – EXTRATO DE FICHA DE INTERPRETAÇÃO PARA VARIACÃO DA MATRIZ DE REFERÊNCIA DE MAPEAMENTO

Ponto	Long.	Lat.	1987		1996	
			INTERPRETAÇÃO	1	INTERPRETAÇÃO	SIMBOLO
1	667188	7215517	rejeito	2	rejeito	RJRJ
2	667318	7215818	bracatinga	1	rejeito	BCRJ
3	667685	7215460	bracatinga	1	decapeamento	BCDC
4	667940	7215291	capoeira	1	mina	CPMN
5	668010	7215066	campo	1	mina	CMMN
6	667980	7215187	capoeira	1	decapeamento	CPDC
7	667432	7214817	mina	2	mina	MNMN
8	667150	7215396	rejeito	1	rejeito revegetado	RJRJV

1 = mudança, 2 = não mudança..

Na interpretação visual comparativa, a decisão sobre a existência ou não de mudanças revelou-se relativamente fácil, embora fosse difícil distinguir entre as mudanças ocorridas pelo avanço de lavra e pelo aumento do depósito de rejeitos, pois a reflectância de ambas as situações se assemelhavam muito.

Na figura 10 está representada a imagem temática de 1996, com a delimitação da poligonal de estudo e, onde estão localizados os pontos amostrais coletados em campo com auxílio de GPS, que representam as diversas classes de utilização da área.

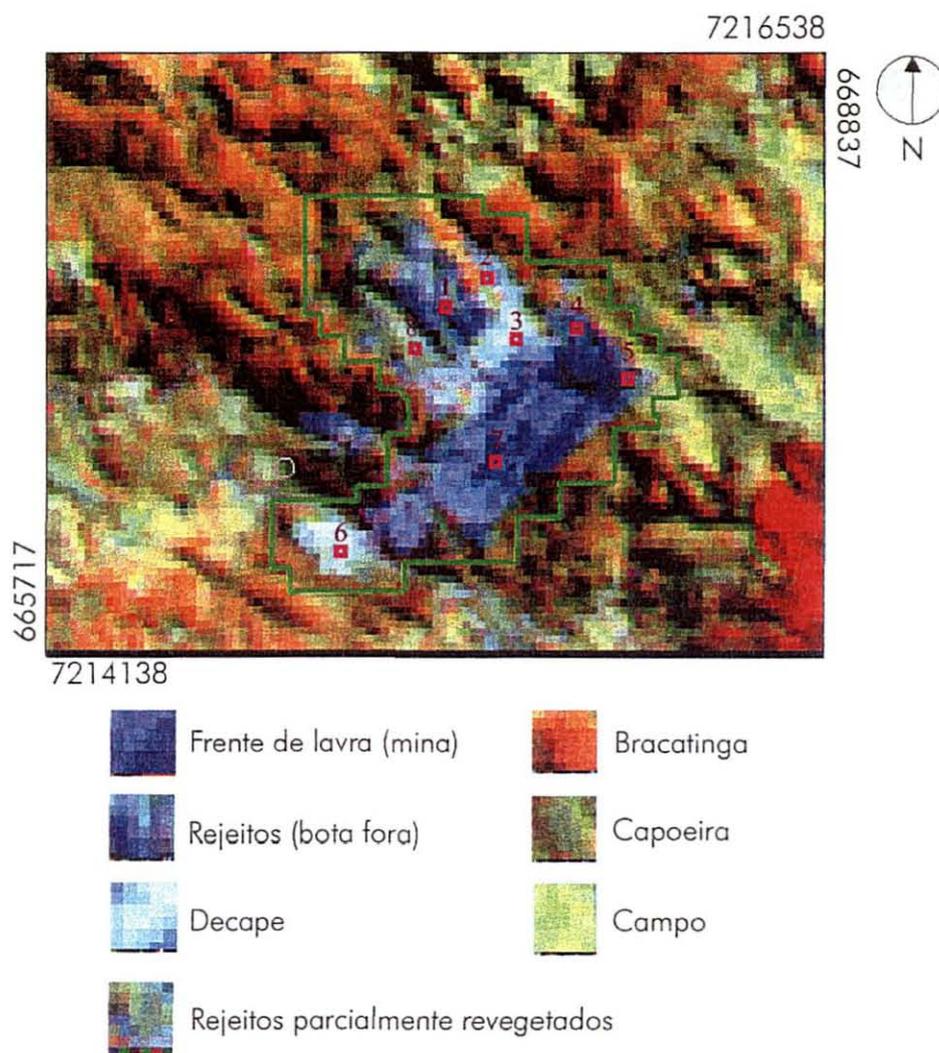


FIGURA 10 – IMAGEM TEMÁTICA (CANAIS 4R, 5G, 3B) DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E PRINCIPAIS CLASSES DE USO DA TERRA NO INTERIOR DA POLIGONAL.

### 3.3.1.3 Aplicação da técnica de subtração de bandas

Após a correção geométrica das cenas, as imagens multiespectrais obtidas em 1987 e 1996 foram utilizadas nas análises de detecção de mudanças.

Para a detecção de mudanças foi utilizada inicialmente a técnica de subtração de bandas. Antes porém de ser efetuada a operação aritmética das imagens foi executada uma

ampliação de contraste em todas as bandas utilizadas, para equalizar a média e o desvio padrão de seus histogramas, de acordo com CRÓSTA (1992) e, em seguida as seguintes operações:

a) recortou-se a imagem, com a utilização somente da poligonal de entorno à mina estudada, com uma dimensão de 53 x 55 pixels, representando 2,6 km<sup>2</sup>;

b) efetuou-se a subtração para cada par de bandas utilizadas, isto é, TM3(1987) e TM3 (1996), TM4 (1987) e TM4 (1996), TM5 (1987) e TM5 (1996). Na técnica de subtração 3 imagens transformadas, uma para cada banda, foram obtidas pela subtração dos valores de pixels dentro de uma banda particular da imagem de 1987 e dos correspondentes valores de pixels da mesma banda da imagem de 1996. A equação utilizada para o cálculo da diferença entre bandas é a dada a seguir, conforme (STAUFFER e MCKINNEY, 1987):

$$\Delta X_{ijk} = X_{(2)ijk, 1996} - X_{(1)ijk, 1987} + C$$

onde:

$\Delta X_{ij}$  = valor do pixel alterado pela diferença;

$X_{(1)}$  = valores de níveis de cinza na imagem de 1987;

$X_{(2)}$  = valores de níveis de cinza na imagem de 1996;

C = constante com valor de 255.

Nota-se, pela equação dada, que os valores dos pixels resultantes da subtração podem gerar valores positivos e negativos. Dessa forma, uma constante (C = 255) foi adicionada a equação para produzir uma imagem com valores não negativos, assumindo uma variação dinâmica de 256 tons de cinza. Assim os valores de pixels nas imagens transformadas podem variar de 0 a 510, com os valores próximos de 255 indicando regiões de nenhuma mudança.

c) inspecionou-se os histogramas das imagens resultantes de cada uma das bandas;

d) estabeleceu-se inicialmente o limiar de classificação visual e classificou-se a imagem resultante em classes de mudança e não mudança;

e) em seguida, caracterizou-se as áreas de mudanças baseadas no desvio padrão.

Um filtro de mediana 3 x 3 foi aplicado uma vez à imagem transformada após a aplicação do limiar de classificação em cada uma das bandas utilizadas na detecção da expansão de áreas de mineração para eliminar as feições de alta frequência preservando as bordas.

A eficiência dessa técnica de detecção de mudança foi baseada em avaliação qualitativa e semi-quantitativa de todas as três imagens transformadas. A avaliação qualitativa foi baseada na análise visual das imagens impressas em papel e na visualização em tela de monitor. A avaliação semi-quantitativa foi baseada na tendência da dispersão dos valores digitais de amostras de treinamento em gráficos construídos para cada banda após a subtração das bandas.

#### 3.3.1.4 Aplicação da técnica de componentes principais

Para a identificação de áreas de expansão da atividade mineral que em última análise é a identificação de áreas de mudança na cobertura do terreno no sentido de perda/redução da vegetação, foi utilizado também a técnica de análise por componentes principais seletivas, como descrito por JIAJU (1988); CHAVEZ e MACKINNON (1994).

A vantagem deste procedimento de detecção de mudanças é que pode ser usado com dados não calibrados, porque ele automaticamente aplica uma calibração de primeira ordem relativa imagem a imagem (CHAVEZ e MACKINNON 1994).

A análise por principais componentes seletivas pode ser usada para mapear informação que é única entre duas imagens (GUNTER, 1982)<sup>3</sup>; (CHAVEZ e KWARTENG, 1989)<sup>4</sup> citados por (CHAVEZ e MACKINNON, 1994).

Foram analisados dois pares temporais de cada banda, em duas datas diferentes e calculou-se as duas componentes principais. Foi abandonada a primeira componente principal (1ª CP), que está associado ao eixo de maior correlação, o qual se admite ser representativo das feições comuns (JIAJU, 1988; CRÓSTA, 1993), e a segunda componente (2ª CP) figura 11, foi tomada como expressão das mudanças ocorridas de uma para outra data.

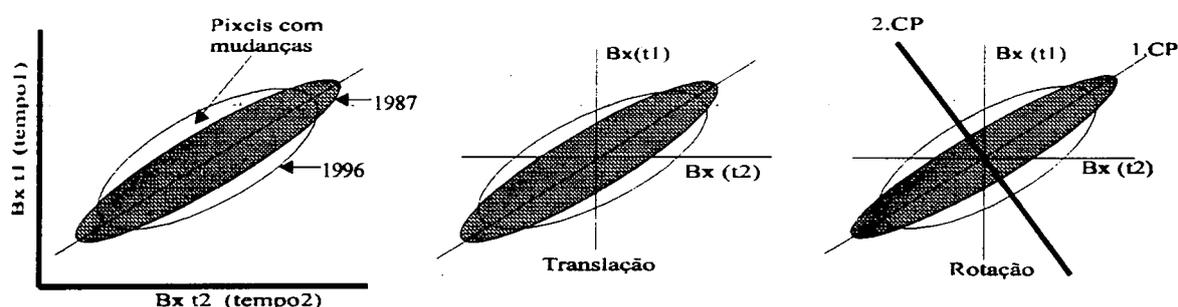


FIGURA 11 – TÉCNICA DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS POR COMPONENTES PRINCIPAIS SELETIVAS

FONTE: adaptada a partir de CARRILHO (1996)

Procedeu-se em seguida, à seleção de bandas, tendo em vista a limitação de disponibilidade destas e os tipos de utilizações dadas aos solos na área de estudos.

<sup>3</sup> GUNTER, F. J., 1982. A new principal components procedure to aid the analysis of Landsat MSS digital data, *Proceedings...* Las Vegas: IEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION AND IMAGE PROCESSING, 1982. p. 38-43.

<sup>4</sup> CHAVEZ, P. S. e KWARTENG, A. Y. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v. 55, n. 8, p. 339-348, 1989.

Para a aplicação da técnica proposta, os passos foram os seguintes:

- a) recortou-se a imagem, com a utilização somente da área de entorno à frente de lavra representada por uma poligonal, com uma dimensão de 53 x 55 pixels, representando 2,6 km<sup>2</sup>;
- b) calculou-se as componentes principais para cada par de bandas, isto é, TM3(1987) e TM3 (1996), TM4 (1987) e TM4 (1996), TM5 (1987) e TM5 (1996);
- c) inspecionou-se os histogramas da 2<sup>a</sup> componente de cada uma das bandas;
- d) estabeleceu-se inicialmente a limiar de classificação visual e classificou-se a 2<sup>a</sup> componente em classes de mudança e não mudança;
- e) Em seguida, determinou-se as áreas de mudanças baseadas no desvio padrão.

Um filtro de mediana 3 x 3 foi aplicado uma vez à segunda componente após a aplicação do limiar de classificação em cada uma das bandas utilizadas na detecção da expansão de áreas de mineração para eliminar as feições de alta frequência preservando as bordas, conforme (CARRILHO, 1996).

A aplicação da técnica de componentes principais para a caracterização de mudanças requer cuidados na interpretação, porque os escores das imagens resultantes não preservam significado físico. De acordo com CROSTA (1992), a primeira componente sempre irá conter o albedo mais o sombreamento topográfico de uma cena e todas as demais componentes são completamente desprovidas de informação topográfica. Através da segunda componente principal, foi possível reconhecer quais os pixels onde se verificou aumento ou redução de resposta espectral, em cada uma das bandas.

Neste procedimento, utilizou-se as segundas componentes de pares de bandas TM3 e TM5 para o período considerado. Dada a natureza das imagens de componentes principais, não se identificam, por exemplo, classes de cobertura vegetal, mas sim, diferenças entre

classes. Numa única banda, uma mesma intensidade de mudança pode ocorrer com dois pares diferentes de uso da terra.

### 3.3.1.5 Escolha do limiar de mudança

No presente trabalho foram testados, sobre as imagens transformadas pela subtração de bandas e segunda componente principal, diferentes limiares representados por 0,5 a 1,5 desvios padrões, a intervalos de 0,25 desvios, sendo adotado o que melhor representou as mudanças ocorridas. A definição do limiar adotado foi por tentativas (JENSEN, 1986).

Os pixels que estavam além do desvio padrão considerado (figura 12), à direita, representaram as mudanças ocorridas no terreno no sentido de perda/redução da vegetação, que podem significar tanto aumento da área da mina ou aumento dos depósitos de rejeito e decapes. Os pixels que estão à esquerda que também representam mudanças ocorridas no terreno, não foram considerados devido ao fato que na poligonal considerada nas áreas representativas não houveram mudanças no sentido de ganho/recuperação da vegetação que fosse possível de ser detectada claramente pelas técnicas utilizadas.

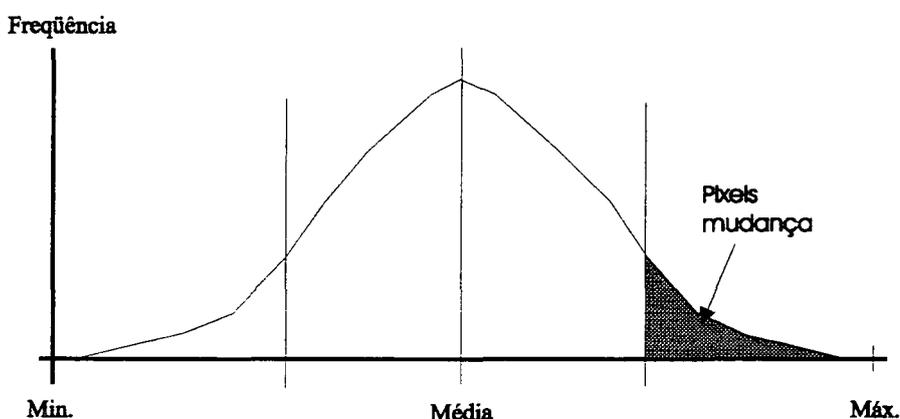


FIGURA 12 – HISTOGRAMA DEMONSTRANDO OS PIXELS QUE FORAM CONSIDERADOS COMO MUDANÇAS.

Após a aplicação dos limiares de mudança nas imagens resultantes da diferença simples, e segunda componente, foram realizadas simples contagens de pixels para quantificar as mudanças ocorridas no sentido de ampliação da mina, decapeamento e do depósito de rejeitos nas imagens com a aplicação dos algoritmos de detecção. Foi quantificada a expansão da área de mineração e a conseqüente perda/redução da vegetação. A precisão dessa detecção foi comparada com os dados de expansão fornecidos pela empresa.

### 3.3.2 Avaliação da detecção automática de mudanças através da subtração de bandas

Para analisar a tendência da distribuição dos valores digitais da imagem e avaliar semi quantitativamente quais mudanças poderiam ser quantificadas com maior precisão, amostras de treinamento foram selecionadas em ambas as imagens para assegurar que representassem todas as coberturas terrestres presentes, levando em consideração as informações disponíveis sobre o uso da área e dados de campo (GPS).

Cuidados foram tomados para selecionar 8 áreas de treinamento representativas, como: polígonos mais homogêneos possíveis, avaliação do histograma de cada amostra a fim de manter a distribuição mais próxima da normal possível e, interpretação prévia da imagem e de levantamento de campo. Através de técnica de amostragem foram digitalizadas áreas de treinamento para toda a área de estudo.

As amostras de treinamento foram coletadas das imagens na composição colorida 4R, 5G, 3B. Para auxiliar na identificação das classes de uso, os pontos de GPS amostrados à campo foram sobrepostos às imagens.

Através da digitalização de um ou mais polígonos nas imagens, foram delimitadas as amostras de treinamento. Os polígonos foram compostos por pixels que apresentavam determinada homogeneidade espectral. Para tanto, a cada assinatura espectral foi calculado a estatística da amostra, donde utilizou-se a média dos valores digitais dentro de cada polígono de treinamento para avaliação das mudanças ocorridas.

Para avaliação semi-quantitativa, calculou-se a média dos valores digitais dos pixels dentro de cada um dos polígonos de treinamento amostrados no entorno dos 8 pontos de controle da matriz de referência de mapeamento. Em seguida eles foram agrupados dentro das classes de mudanças e não-mudança nas imagens de 1987 e 1996. Para efeito de análise foram consideradas as classes de mudanças e não-mudança definidas na tabela 5 do item 3.3.1.2.

Os valores digitais médios de cada banda da imagem de 1987 foram subtraídos dos respectivos valores digitais médios da imagem de 1996 e adicionados de uma constante de 255, para evitar valores negativos. Conseqüentemente valores próximos de 255 são indicativos de nenhuma mudança.

Após a subtração os valores digitais médios para cada banda foram plotados em gráficos. Para estabelecer a zona de mudança e não mudança foi atribuído empiricamente baseado no conhecimento de campo e observação da imagem, um desvio de 55 níveis em torno do valor 255, indicando este, uma zona de não mudança, isto é, os valores médios dos polígonos de treinamento resultantes da subtração que encontravam-se com valores digitais no range de 200 a 310 foram considerados como indicativos de não mudanças.

### 3.3.3 Caracterização e rotulação das mudanças

A caracterização das mudanças tanto na técnica de componentes principais como diferença simples objetivou quantificar e localizar a expansão das áreas de mineração ocorridas no período estudado.

Os temas utilizados na imagem temática final de caracterização designam a intensidade de expansão das frentes de lavra, depósitos de rejeitos e decapeamento num período de 9 anos e, estes foram rotulados sobre as imagens resultantes, como avanço de lavra, rejeitos e decapeamento.

A caracterização e rotulação foi possível com a utilização de um aplicativo do *MGE Advanced Imager* denominado *Density Slice*, onde podem ser aplicadas cores homogêneas ou gradiente de cores aos pixels que denotam mudanças. Sobre as imagens resultantes foram aplicados gradientes de cores aos pixels, conforme a intensidade de mudanças que estes caracterizaram.

A partir de observações de campo e da montagem da matriz de referência, as classes de ocupação da terra presentes na área de estudos foram agrupadas da seguinte forma, porém não foram rotuladas nas imagens finais. Estas podem ser visualizadas na figura 10, anteriormente sumarizada.

- a) bracinga;
- b) capoeira;
- c) campo;
- d) frente de lavra (mina);
- e) rejeitos (bota-fora);
- f) decape (solo exposto);
- g) rejeitos parcialmente revegetados.

As mudanças que ocorreram e foram possíveis de serem detectadas visualmente na poligonal estudada foram no sentido de perda/redução de vegetação, quando do avanço das frentes de lavra, aumento dos depósitos de rejeito e decapamentos, e estas foram rotuladas nas imagens finais. As mudanças no sentido de ganho/recuperação da vegetação, quando os depósitos de rejeitos foram parcialmente recompostos floristicamente, não foram possíveis de serem claramente detectadas visualmente. A intensidade de mudança foi tanto maior quanto maior a diferença entre os níveis de perda ou ganho entre imagens de uma e outra data.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ESTATÍSTICA E HISTOGRAMAS DAS IMAGENS BRUTAS

Nota-se na tabela 6, observando as 3 bandas da imagem da mina Saivá, que a banda 5 da cena de 1987 foi a que apresentou maior contraste, pois a distribuição dos níveis de cinza estão representados em uma amplitude maior que as outras duas bandas, o mesmo pode-se observar na imagem de 1996. O desvio padrão na mesma banda também foi maior em ambas as imagens caracterizando uma melhor distribuição dos níveis de cinza no intervalo (0-255).

TABELA 6 - ESTATÍSTICAS DA IMAGEM TM/LANDSAT

Banda	Média	Desvio padrão	Valor Mínimo	Valor máximo	Amplitude
ANO 1987					
TM3	33.888	12.918	19	112	93
TM4	61.906	12.160	22	109	87
TM5	76.939	19.959	26	168	142
ANO 1996					
TM3	15.868	7.146	6	63	57
TM4	29.681	10.492	0	77	77
TM5	34.971	16.301	0	117	117

Analisando-se a tabela 6, nota-se que a imagem bruta de 1987 foi mais nítida que a cena de 1996, pois os pixels estão mais amplamente distribuídos nos intervalos de níveis de cinza das bandas. O desvio padrão também foi maior em todas as bandas na imagem de 1987, denotando ser esta imagem de interpretação mais fácil por apresentar maior contraste.

A banda TM3 utilizada no presente trabalho correspondeu àquela da região do visível do espectro eletromagnético e apresentou baixo desvio padrão, principalmente na cena de 1996 que conseqüentemente mostrou menor contraste. Em ambas as datas teve sua

distribuição de níveis de cinza com apenas um pico acentuado em torno da média, 33,88 *pixels* para 1987 e 15,86 *pixels* para 1996. O histograma da banda 3 foi unimodal e os pixels na banda 3 encontraram-se concentrados em um intervalo estreito próximo a origem (figura 13).

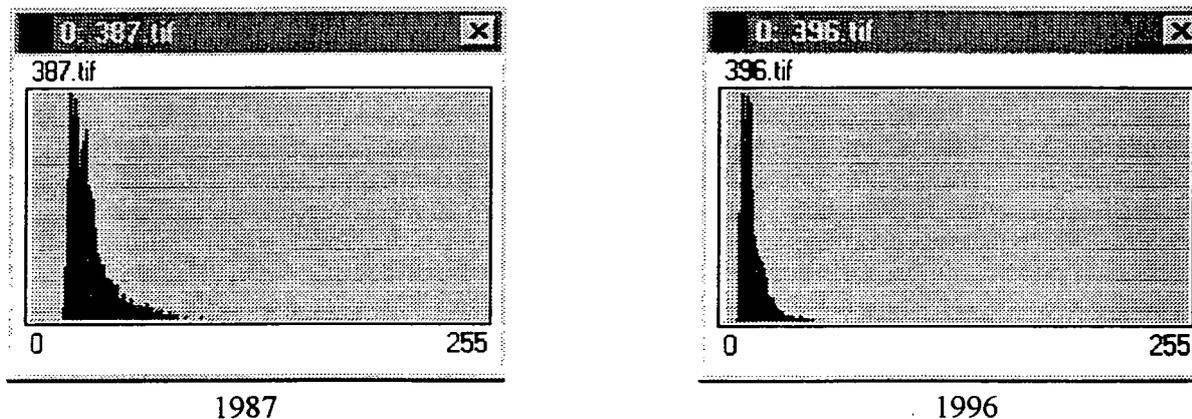


FIGURA 13 - HISTOGRAMAS DA BANDA 3 – IMAGENS DE 1987/1996

A banda 4 apresentou seus valores de cinza melhor distribuídos no intervalo (figura 14) do que a banda 3. Além disso, apresentou também um único pico em torno da média 61,90 *pixels* em 1987 e 29,68 *pixels* em 1996.

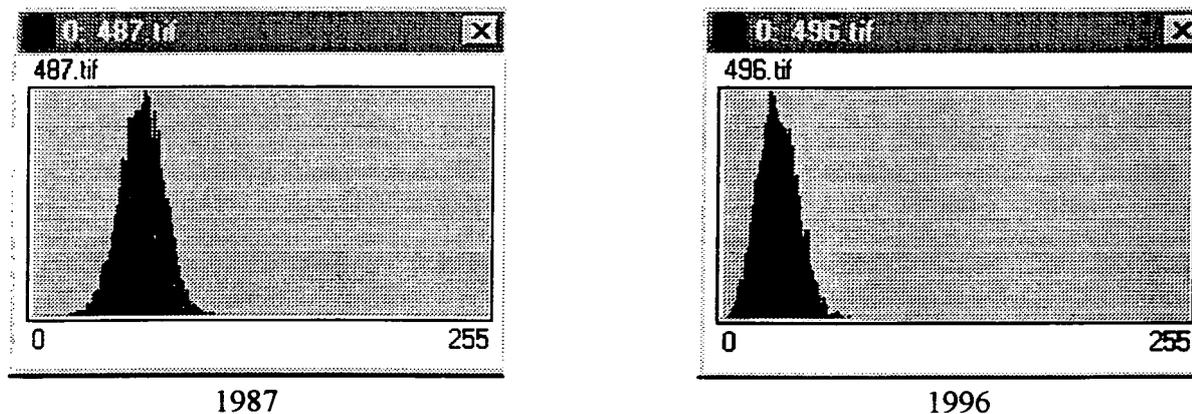


FIGURA 14 - HISTOGRAMAS DA BANDA 4 – IMAGENS DE 1987/1996

A banda 5 da imagem de ambas as datas apresentou histograma unimodal, e das três bandas analisadas foi a que possuiu os valores de cinza melhor distribuídos ao longo do intervalo caracterizado pelo seu alto desvio padrão. Apresentou também maior contraste, pois seus níveis de cinza estavam representados em um intervalo maior (figura 15).

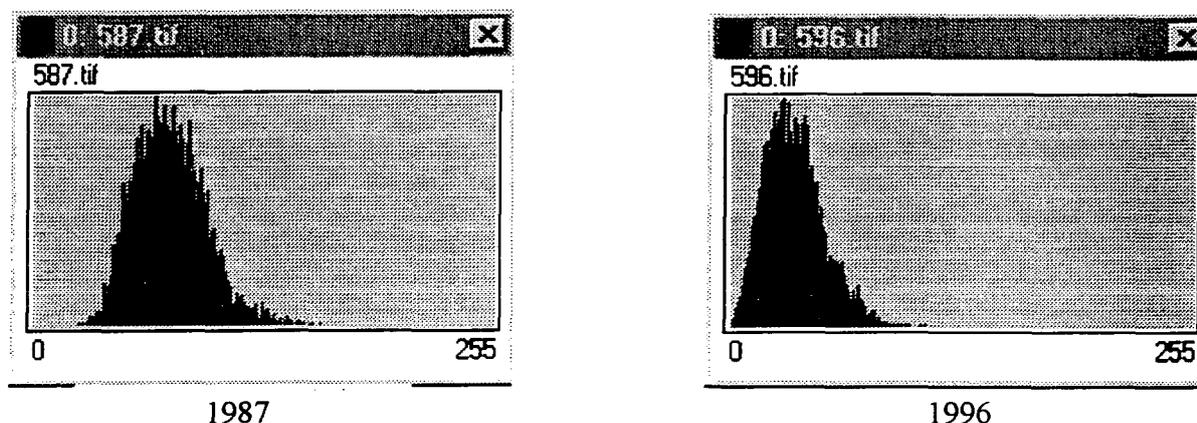


FIGURA 15 - HISTOGRAMAS DA BANDA 5 – IMAGENS DE 1987/1996.

## 4.2 AVALIAÇÃO DAS IMAGENS RESULTANTES DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS

### 4.2.1 Avaliação das imagens resultantes da subtração de bandas

As três imagens transformadas pela diferença entre as bandas TM3, TM5 e TM4 são mostradas nas figuras 16, 17 e 18. Nessas figuras, nota-se em cada imagem que os pixels brancos e escuros representam áreas onde ocorreram mudanças entre 1987 e 1996, enquanto que os tons intermediários de cinza representam áreas sem mudanças. Resultados semelhantes obtiveram SOARES e HOFFER (1996) ao analisarem as imagens resultantes da subtração

simples de bandas na detecção de mudanças em plantações de eucaliptos ocasionados pelo manejo destes.

As áreas que aparecem com pixels claros representam mudanças da classe de uso vegetação (bracatinga, capoeira e campo) para mineração, depósito de rejeitos e decape, isto é, estes pixels denotam o avanço da frente de lavra e aumento dos depósitos de rejeito e conseqüente perda/redução da vegetação, que em última análise indicam a expansão da área de mineração. No trabalho de SOARES e HOFFER (1996), utilizando subtração simples de bandas, os pixels claros denotaram as mudanças ocorridas no período estudado no sentido de supressão/redução da vegetação na superfície do solo.

Pela análise visual das imagens transformadas observou-se, que entre as três bandas analisadas, a imagem transformada da banda 3 (figura 16) deu resultados satisfatórios, isto é, ela proporcionou maior grau de contraste entre as áreas de mudança e não mudança consideradas, realçando melhor as áreas decapeadas e o avanço da frente de lavra pois estes apresentam maior reflectância na banda considerada.

A imagem transformada da banda 5 (figura 17) deu bons resultados também, porém realçando em menor intensidade as áreas decapeadas e em maior intensidade os depósitos de rejeitos mais antigos. A imagem transformada da banda 4 (figura 18) não forneceu resultados satisfatórios para serem analisados visualmente para detecção de áreas de avanço das frentes de lavra e aumento nos volumes dos depósitos de rejeitos e decapeamento, por este motivo foi abandonada e seguiu-se a análise utilizando somente as banda 3 e 5 transformadas.

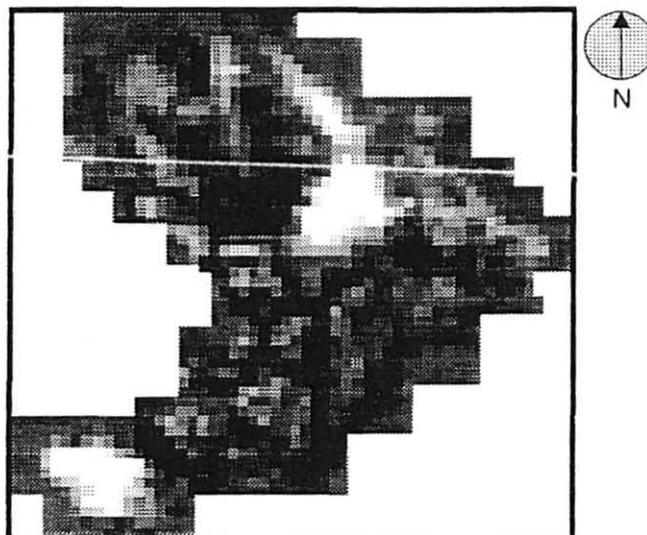


FIGURA 16 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS INDIVIDUAIS TM3 TOMADAS EM 1987 E 1996

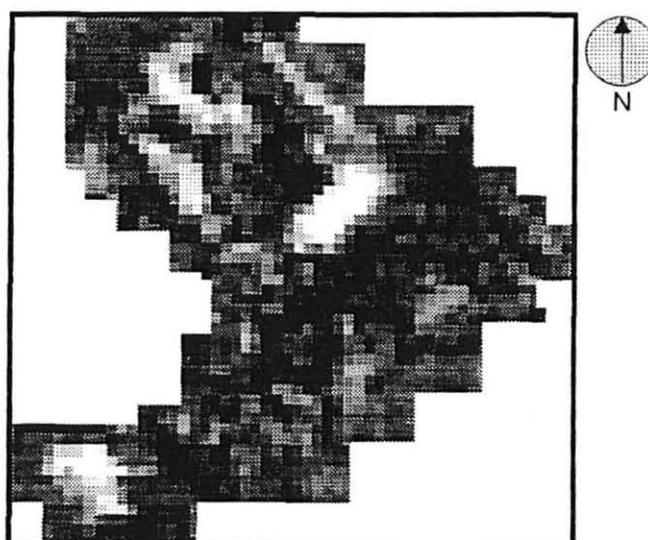


FIGURA 17 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS INDIVIDUAIS TM5 TOMADAS EM 1987 E 1996

Na banda 4 transformada (figura 18) observou-se uma ligeira inversão nos valores de pixel em relação à banda 3, principalmente na porção nordeste da imagem, conforme indicado

na figura 18, em vermelho, que constitui o avanço da frente de lavra. Esta inversão observou-se com maior clareza na mudança da classe de vegetação campo para avanço da frente de lavra. A explicação para esta inversão na tonalidade é baseada no fato que a vegetação tem maior reflectância espectral do que o solo e o minério nas bandas do visível e do infravermelho médio, porém ela é menor na banda do infravermelho próximo. Como houve inversão em reflectância na região do infravermelho próximo, em comparação com a reflectância nas regiões do visível e do infravermelho médio, as tonalidades representando ampliação de frente de lavra também se inverteram.

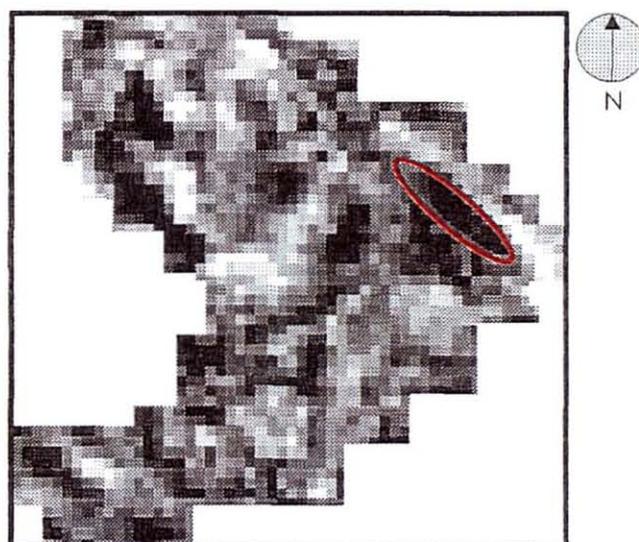


FIGURA 18 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS INDIVIDUAIS TM4 TOMADAS EM 1987 E 1996.

Na análise visual das imagens-diferença, as tonalidades que denotam as áreas de avanço das frentes de lavra e aumento dos depósitos de rejeito, não foram diferenciadas, isto foi observado em campo e deve-se a constituição dos depósitos de rejeito, pois além de serem construídos com solo retirado dos processos de decapeamento do minério, apresentam grande

quantidade de material oriundo da mina, calcário, que é deixado na superfície. Conseqüentemente a resposta espectral da frente de lavra e do depósito de rejeitos é muito semelhante, visto que, dentro da própria mina, há sempre porções de solo. Este detalhe pode ser observado na figura 19 onde sobre o depósito de rejeitos há uma grande quantidade de minério com a mesma coloração da frente de lavra ao fundo, com isso a resposta espectral de ambas as situações é semelhante.

Analisando-se visualmente as imagens transformadas, pôde-se observar uma diferenciação entre áreas decapeadas para avanço da frente de lavra e ampliação dos depósitos de rejeitos, pois aquelas, possuem uma reflectância maior nas bandas consideradas e são representadas nas imagens transformadas das bandas 3 e 5 pelos pixels mais claros.



FIGURA 19 – VISTA DO DEPÓSITO DE REJEITOS COM GRANDE QUANTIDADE DE MINÉRIO NA SUPERFÍCIE E DA FRENTE DE LAVRA, FACE SW.

Nas áreas decapeadas, o horizonte do solo com maior quantidade de matéria orgânica, horizonte A, e que estava coberto por vegetação, foi retirado. O horizonte mineral remanescente correspondendo ao horizonte B ou C apresentam menor quantidade de matéria orgânica, portanto são mais claros e apresentam maior reflectância do que o minério que é escuro e do depósito de rejeitos que apresenta grande quantidade deste na superfície. Estes dois últimos apresentam comportamento espectral muito semelhante, portanto difíceis de serem separados espectralmente.

#### 4.2.2 Avaliação semi-quantitativa das imagens resultantes da subtração de bandas

Após efetuada a subtração, os valores digitais médios dos polígonos de treinamento foram plotados em gráficos para as duas bandas consideradas, TM3 e TM5, referentes respectivamente a banda do vermelho e infravermelho médio.

Na figura 20 encontram-se plotados no gráfico os valores digitais médios resultantes da subtração de bandas referente a banda 3.

Analisando-se a figura 20 observou-se que os valores digitais médios para a classe de não-mudança se encontram localizados na zona de não mudança, ou seja dentro do intervalo de 55 desvios para a direita e esquerda de 255, conforme indicação em vermelho.

As classes de mudanças no sentido de perda/redução da vegetação que foram caracterizadas respectivamente em 1987 e em 1996 como: bracinga/depósito de rejeitos; bracinga/decapeamento; capoeira/mina; campo/mina; capoeira/decapeamento, estão localizadas acima da zona de não mudança.

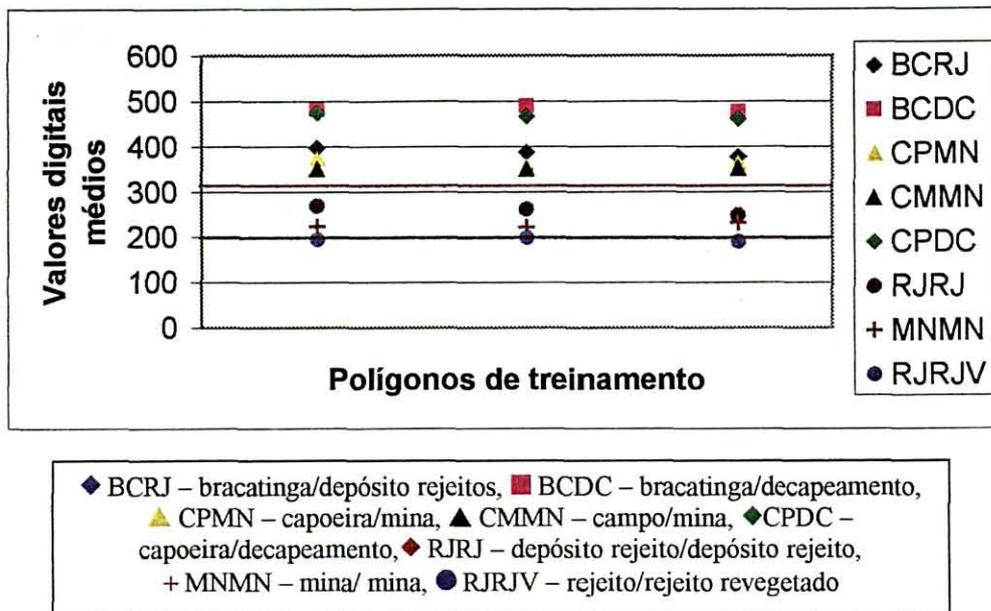


FIGURA 20 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS OBTIDOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO PARA A IMAGEM TRANSFORMADA DA BANDA 3, RESULTANTE DA SUBTRAÇÃO DE BANDAS.

A classe de mudança que ocorreu, passível de ser observada em campo, no sentido de ganho/recuperação da vegetação, amostrada e representada pela classe rejeito/rejeito revegetado, apresentou os valores digitais médios resultantes da subtração muito próximos da zona de não mudança, conforme podem ser observados na tabela 7. Estes valores nos dão indícios da existência de processos de regeneração florística em fase inicial, porém não possível de distinção clara na imagem utilizada. Este resultado vem de encontro a que afirmou (GIRARD-GANNEAU<sup>5</sup>, citado por EPIPHANIO *et al*, 1992), onde até uma cobertura vegetal de 15% uma superfície aparece como solo, enquanto que acima de 40% de cobertura, o comportamento espectral tende cada vez mais para o da vegetação.

<sup>5</sup> GIRARD-GANNEAU, C. M. Utilisations de la télédétection en agronomie. Thesis for the title of Docteur Ingénieur. Université Paris- Sud. Centre d'Orsay. 1975.

TABELA 7 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO RESULTANTES DA SUBTRAÇÃO DA BANDA TM3.

	Polígonos de treinamento							
	BCRJ	BCDC	CPMN	CMMN	CPDC	RJRJ	MNMN	RJRJV
Valores	397	481	373	350	472	268	222	193
digitais	387	488	355	350	466	260	220	197
médios	377	476	364	351	460	248	231	189

BCRJ – bracatinga/depósito rejeitos. BCDC – bracatinga/decapeamento. CPMN – capoeira/mina. CMMN – campo/mina. CPDC – capoeira/decapeamento. RJRJ – depósito rejeito/depósito rejeito. MNMN – mina/ mina. RJRJV – rejeito/rejeito revegetado

Esta dificuldade de distinção deveu-se porque na imagem de 1996 os processos de recomposição florística dos depósitos de rejeitos imageados ainda estavam em fase inicial de desenvolvimento e, portanto a resposta espectral deste alvo ainda continha muita influência do substrato ou seja da superfície do depósito de rejeitos, conforme pode ser visualizado em foto parcial deste na figura 21.

Baseado na tendência da dispersão dos valores digitais médios nos gráficos das bandas 3 e 5 (figuras 20 e 22) resultantes da subtração de bandas, definiu-se pela caracterização das mudanças nas imagens resultantes com aplicação de limiares somente nas áreas representativas de mudanças no sentido de perda/redução da vegetação. Estas áreas correspondem aos pixels que estão a direita dos histogramas das imagens que conseqüente representam a expansão da área de mineração e ou depósitos de rejeitos e decapeamento.



FIGURA 21 – VISTA PARCIAL DA SUPERFÍCIE DO DEPÓSITO DE REJEITOS MAIS ANTIGO COM VEGETAÇÃO EM ESTÁGIO INICIAL DE DESENVOLVIMENTO, FAÇE NW.

Na figura 22 encontram-se plotados em gráfico os valores digitais médios ilustrados na tabela 8 resultantes da subtração de bandas referentes a banda 5.

Ao analisarmos os valores digitais médios para as classe de mudanças no sentido de perda/redução da vegetação, observamos que estes não encontram-se na sua totalidade na zona de mudanças. Para as áreas de não mudanças como rejeito/rejeito, mina/mina os valores digitais médios encontraram-se na zona de não mudança.

Os valores digitais médios resultantes da subtração que encontraram-se na zona de mudanças foram os que representaram a supressão da vegetação de maior porte para decape e

depósito de rejeitos, sejam eles: bracatinga/depósito de rejeito, bracatinga/decapeamento e capoeira/decapeamento.

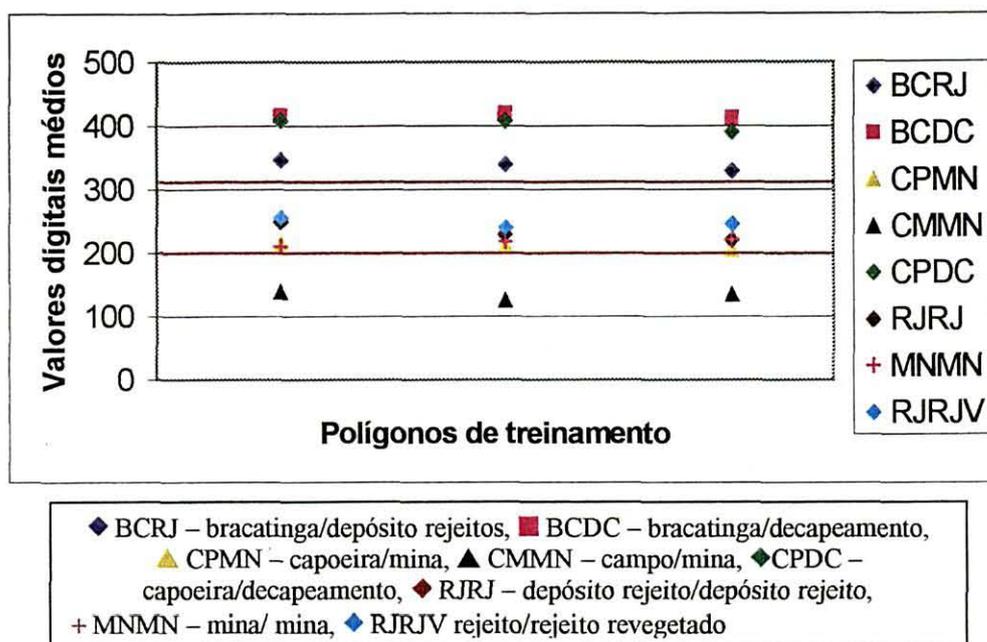


FIGURA 22 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS OBTIDOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO PARA A IMAGEM TRANSFORMADA DA BANDA 5, RESULTANTE DA SUBTRAÇÃO DE BANDAS.

Ocorreu porém que a média para os polígonos que representavam mudanças de capoeira/mina e de rejeito/rejeito revegetado encontraram-se na zona de não mudança. Na banda 3 os valores médios dos polígonos de treinamento da classe rejeito/rejeito parcialmente revegetado estavam muito próximos da zona de não mudança. Este comportamento dos valores digitais médios dos polígonos de treinamento resultantes da subtração, evidenciou uma menor possibilidade de detecção de mudanças quando as diferenças entre as duas épocas consideradas envolviam vegetação de pequeno porte.

Houve também uma inversão no comportamento esperado para os valores digitais médios dos polígonos de treinamento representativos da mudança no sentido de perda/redução da vegetação representados pelos polígonos da classe campo/mina, apresentando-se no gráfico da figura 22, como área de mudança no sentido de ganho/recuperação da vegetação.

Este comportamento ocorreu porque as áreas de campo, amostradas na imagem mais antiga, eram utilizadas como pastagem e estavam degradadas. Consequentemente sua reflectância é maior do que é esperado para campo natural na banda TM5. O calcário como já dito anteriormente tem tonalidade escura e, como o avanço da mina deu-se para o nordeste e na maior parte sobre área de campo, esta inversão ocorreu pelo fato de que o mesmo possui menor reflectância do que o campo e, consequentemente houve esta inversão dos valores digitais médios resultantes da subtração de bandas, conforme apresentado na tabela 8 e, por isto encontram-se plotados na zona de mudanças no sentido de recuperação da vegetação.

TABELA 8 - VALORES DIGITAIS MÉDIOS DOS POLÍGONOS DE TREINAMENTO RESULTANTES DA SUBTRAÇÃO DA BANDA TM5

	Polígonos de treinamento							
	BCRJ	BCDC	CPMN	CMMN	CPDC	RJRJ	MNMN	RJRJV
Valores	345	414	214	138	407	250	209	255
digitais	339	419	211	125	407	229	217	239
médios	329	411	204	134	390	220	221	245

BCRJ – bracinga/depósito rejeitos, BCDC – bracinga/decapeamento, CPMN – capoeira/mina, CMMN – campo/mina, CPDC – capoeira/decapeamento, RJRJ – depósito rejeito/depósito rejeito, MNMN – mina/ mina, RJRJV – rejeito/rejeito revegetado

Pela análise do comportamento dos valores digitais médios dos polígonos de treinamento na banda 5 observou-se um menor potencial desta banda em discriminar as

mudanças ocorridas no sentido de expansão da área de mineração para calcário calcítico, seja pelo avanço da frente de lavra, decapeamento e aumento dos depósitos de rejeitos quando estes ocuparam áreas de capoeira e campo.

Como o aumento da frente de lavra deu-se, na maior parte, sobre áreas de campo, este detalhe não foi caracterizado nesta banda. Caracterizou melhor, porém, o avanço dos depósitos de rejeitos mais antigos e que se deram principalmente sobre áreas de bracinga. Estes resultados corroboram com a observação de GREEN *et al.* (1994) que o método de diferenças simples permite detectar com alta precisão a perda de vegetação de grande porte, mas perde força quando se trata de detectar mudanças em áreas de vegetação rasteira havendo diferentes condições de umidade do solo.

#### 4.2.3 Aplicação do limiar de classificação das mudanças nas imagens resultantes de subtração

Após a análise visual das três imagens transformadas pela subtração simples e pelo comportamento dos valores digitais médios dos polígonos de treinamento para as bandas transformadas, optou-se pela aplicação de limiares de mudança somente nas bandas TM3 e TM5 transformadas. Para estas imagens foram testados limiares que variaram de 0,5 a 1,5 desvios padrões para a direita, a intervalos de 0,25 desvios, para melhor caracterizar visualmente as mudanças ocorridas no sentido de expansão da área minerada.

As imagens resultantes da subtração simples que melhor caracterizaram as mudanças ocorridas na área de influência direta da mina, foram aquelas onde se estabeleceu que as mudanças eram representadas pelos pixels com níveis de cinza além de 1 desvio padrão (anexos 1 e 2) e imagens ilustradas nas figuras 23 e 24.

Na caracterização das áreas de mudanças, atribuiu-se cores aos pixels representativos destas.

Para atribuir cores aos pixels representativos das mudanças consideradas, utilizou-se de um módulo do *MGE Advanced Imager* denominado “*density slice*”, onde foi possível atribuir cores às áreas de avanço da frente de lavra, decapeamento e aumento dos depósitos de rejeitos.

Nas imagens transformadas as cores atribuídas tiveram um gradiente, variando do vermelho ao azul. As cores vermelhas realçaram os maiores valores digitais e as azuis, os menores valores no intervalo considerado além de um desvio padrão. As tonalidades vermelhas e amarelas realçaram as áreas com maior reflectância que correspondem ao decapeamento na imagem transformada da banda TM3 e, quanto maior a proporção de minério na superfície a tendência da cor foi ficar esverdeada.

Na figura 23 as tonalidades de pixels verdes ilustraram as áreas de solo misturado com minério, que caracterizam os depósitos de rejeitos, bem como pode representar em algumas situações áreas de avanço da frente de lavra. Esta confusão deve-se tanto a ampliação do depósito de rejeito quanto pelo aumento da área de lavra, pois em ambos os casos há uma grande mistura de solo e minério que apresentam comportamento espectral muito semelhante em ambas as situações.

Nas porções da imagem como a oeste, onde os taludes dos depósitos de rejeitos possuem a face voltada para o mesmo sentido, observamos uma maior concentração de pixels em tom azul. Esta caracterização se deu por diferenças no sombreamento destas áreas, pois de acordo com GREEN *et al.* (1994), o método de diferença simples perde precisão quando existem variações de sombreamento, resultante de variações nas condições de iluminação.

As áreas de solo descoberto foram melhor realçadas por causa de sua alta reflectância na banda vermelho, diferentemente das áreas de rejeito e avanço de lavra, onde na superfície sempre havia grande quantidade de minério com coloração escura e conseqüentemente, menor reflectância.

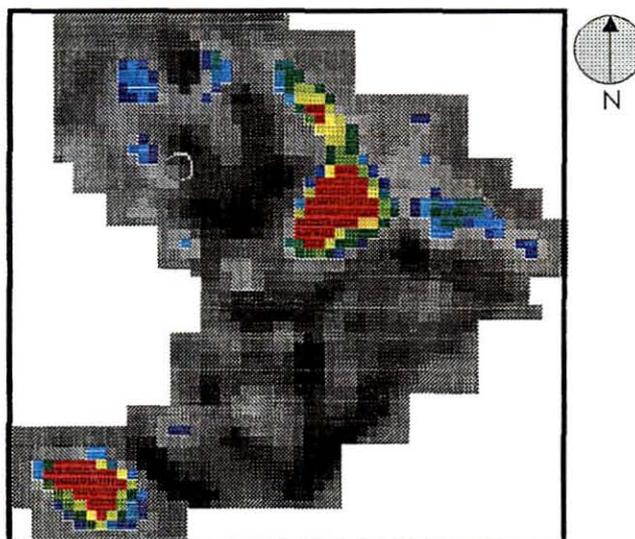


FIGURA 23 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA SUBTRAÇÃO DE BANDAS TM3 COM APLICAÇÃO DO LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO.

Na imagem transformada da banda TM5 (figura 24) através da atribuição de cores aos pixels que representam as mudanças ocorridas, no sentido de expansão da área minerada, as áreas de decapeamento, tiveram maior realce aparecendo em vermelho e amarelo. Nas regiões onde o solo estava misturado ao minério, como a oeste da cena, a coloração apresentou-se esverdeada.

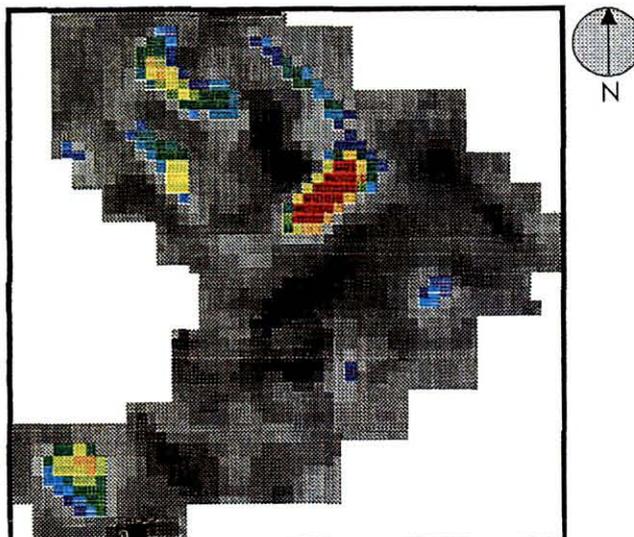


FIGURA 24 - IMAGEM TRANSFORMADA PELA SUBTRAÇÃO DE BANDAS TM5 COM APLICAÇÃO DE LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO.

Na banda 5 transformada houve uma maior sensibilidade para caracterizar as áreas onde aumentaram os depósitos de rejeitos mais antigos a noroeste da imagem, diferentemente da banda 3 onde este aumento não foi bem caracterizado. Esta melhor caracterização das áreas de rejeito a oeste da cena deveu-se ao fato destes serem mais antigos e, portanto mais estabilizados e com maior quantidade de umidade, possível de ser captada pela banda 5. CARRILHO (1996) utilizou-se desta banda para distinção de solo exposto com e sem umidade. Na porção norte da imagem o depósitos de rejeitos mais recente, menos estabilizado e com menor conteúdo de umidade foi menos caracterizado. Além disto os depósitos de rejeitos a oeste da imagem avançaram sobre áreas de vegetação de maior porte.

#### 4.2.4 Avaliação semi-quantitativa das imagens resultantes da análise por componentes principais

Na tabela 9 apresentada a seguir observa-se que a maior percentagem de variância atribuída a uma segunda componente principal, ocorreu na banda TM3 6,15%, seguida da banda TM 5 com 5,97% e TM4 2,60%, indicando que a banda 3 foi a mais sensível a mudanças na cobertura vegetal. A banda que apresentou maior correlação (0,9121) entre uma data e a seguinte foi a banda TM4, demonstrando com isso o menor potencial desta em detectar mudanças ocorridas no período considerado. A segunda maior correlação apresentou a banda TM5 em valor de 0,8323.

TABELA 9 - TRANSFORMAÇÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS SELETIVAS DAS BANDAS TM3, TM4 E TM5: 1987 E 1996

BANDA TM 3			BANDA TM 4			BANDA TM 5		
VARIÂNCIA – COVARIÂNCIA			VARIÂNCIA – COVARIÂNCIA			VARIÂNCIA – COVARIÂNCIA		
	TM387	TM396		TM487	TM496		TM587	TM596
TM387	688,42	299,20	TM487	892,38	388,36	TM587	1459,26	685,30
TM396	299,20	195,60	TM496	388,36	203,17	TM596	685,30	464,35
MATRIZ DE CORRELAÇÃO			MATRIZ DE CORRELAÇÃO			MATRIZ DE CORRELAÇÃO		
	TM387	TM396		TM487	TM496		TM587	TM596
TM387	1	0,8153	TM487	1	0,9121	TM587	1	0,8325
TM396	0,8153	1	TM496	0,9121	1	TM596	0,8325	1
AUTOESTRUTURA			AUTOESTRUTURA			AUTOESTRUTURA		
	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2
% var.	93,84	6,15	% var.	97,39	2,60	% var.	94,02	5,97
Autovalor	829,62	54,40	Autovalor	1066,99	28,56	Autovalor	1808,62	114,98
Autovet1	0,9044	-0,4268	Autovet1	0,9121	-0,4100	Autovet1	0,8909	-0,4542
Autovet2	0,4268	0,9044	Autovet2	0,4100	0,9121	Autovet2	0,4542	0,8909

Usando-se análise de componentes principais seletivas com somente duas imagens de entrada torna-se a interpretação mais fácil e direta, porque a informação que é comum para ambas as imagens será mapeada na primeira componente e a informação que é única para

cada imagem será mapeada na segunda componente CHAVEZ e KWARTENG (1989)<sup>6</sup> citados por (CHAVEZ e MACKINNON, 1994).

Um dos principais benefícios da utilização de somente duas bandas de entrada na análise de componentes principais seletivas é que este procedimento automaticamente elimina as diferenças de amplitudes de baixa frequência entre duas imagens e, com isso os resultados tornam-se mais confiáveis (CHAVEZ e MACKINNON, 1994), conforme podemos visualizar os histogramas das segundas componentes principais nos anexos 3 e 4.

Comparando as mudanças detectadas na simples subtração de bandas nas figuras 16 e 17 e na segunda componente principal das bandas TM3 e TM5 nas figuras 25 e 26, observamos que no segundo procedimento as mudanças foram melhor caracterizadas. Isto pode ser observado pela análise visual dessas duas imagens, onde os pixels mais claros representam as mudanças no sentido de perda/redução da vegetação.

Nas mudanças detectadas na segunda componente principal, além de uma melhor visualização, houve também uma melhor quantificação destas com aplicação do limiar de mudanças de um desvio padrão.

Na segunda componente da banda TM 4 as áreas de mudanças no sentido de perda/redução da vegetação, não foram bem caracterizadas visualmente, por isto esta imagem não foi considerada.

---

<sup>6</sup> Ibid. p. 56.

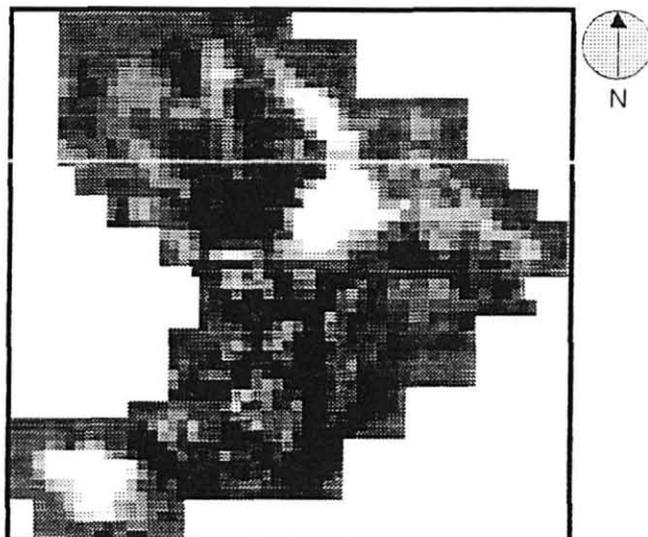


FIGURA 25 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA  
TM3

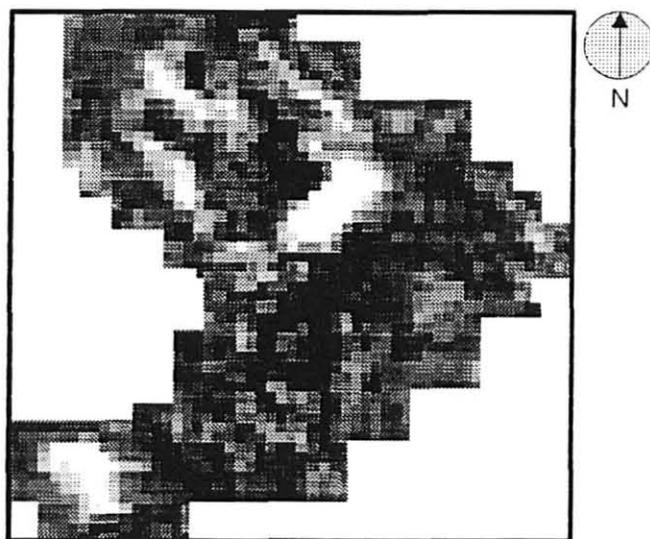


FIGURA 26 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA  
TM 5

#### 4.2.5 Aplicação de limiar de mudança nas imagens resultantes da análise de componentes principais

Nas segundas componentes principais foram testados limiares de 0,5 até 1,5 desvios, conforme haviam sido testados na subtração simples, sendo adotado como melhor imagem resultante para visualização e caracterização semi-quantitativa das mudanças ocorridas o limiar de 1 desvio a direita, representando os pixels que caracterizaram as mudanças no sentido de perda/redução da vegetação.

Semelhante aos resultados obtidos na subtração simples de imagens, a segunda componente principal da banda 3 caracterizou melhor os pixels representativos das mudanças observadas na área, quantificando porém, melhor o avanço da frente de lavra como pode ser visualizado na figura 27.

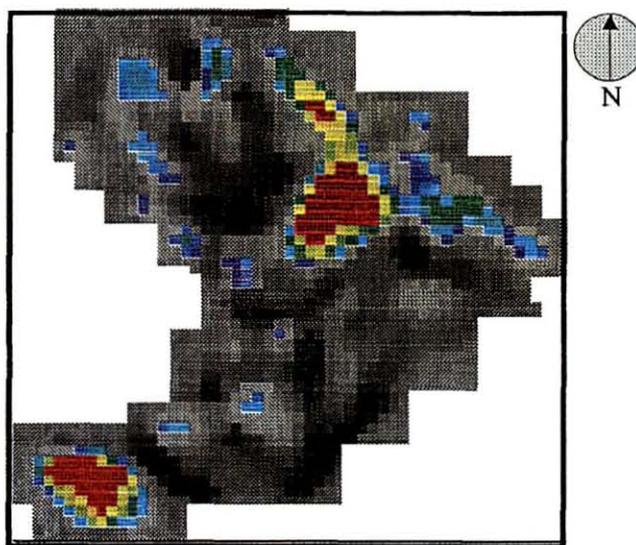


FIGURA 27 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM3 COM APLICAÇÃO DO LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO.

Comparando-se a imagem da segunda componente principal da banda TM3 após a aplicação do limiar de mudança (figura 27) em relação a imagem transformada pela subtração simples de bandas TM3 (figura 23), observamos que os pixels representativos do avanço da frente de lavra naquela foram caracterizados com maior precisão.

Na segunda componente principal da banda TM5 (figura 28) a caracterização das áreas decapeadas e rejeitos foi mais ampla do que na simples subtração de bandas ilustrado na figura 24.

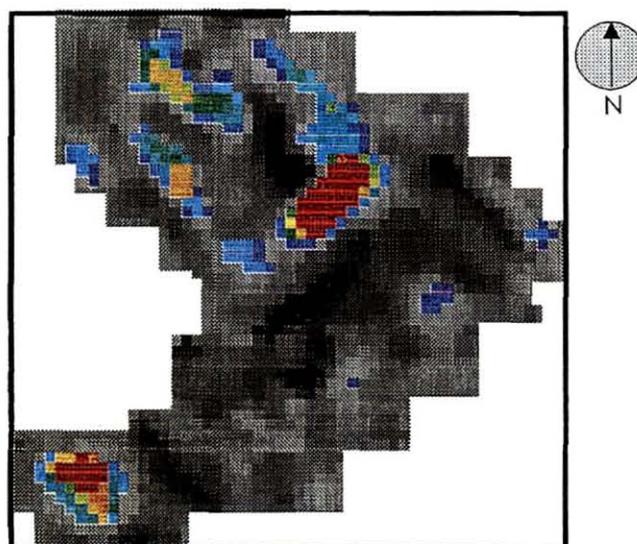


FIGURA 28 – IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM 5 COM APLICAÇÃO DO LIMIAR DE MUDANÇA DE UM DESVIO PADRÃO.

Esta maior precisão das mudanças ocorridas a campo deu-se pela capacidade deste procedimento em eliminar automaticamente a maior parte das amplitudes de baixa frequência entre duas imagens, conforme explicado por (CHAVEZ e MACKONNON, 1994). Porém, como também ocorreu na simples subtração de bandas, a segunda componente principal da banda TM5 não caracterizou as áreas de avanço da frente de lavra sobre o campo.

### 4.3 QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE MUDANÇAS NAS DUAS TÉCNICAS UTILIZADAS

Através da simples contagem de pixels em cada banda transformada pelos dois algoritmos utilizados, efetuou-se a quantificação das áreas onde ocorreram mudanças no sentido de perda/redução da vegetação mostrados na tabela 8. A contagem dos pixels representando mudanças foi feita a partir de 0,5 desvio padrão a direita até o limite de 1,5 desvios, considerando intervalos de 0,25. Adotou-se para o presente estudo o limiar de 1 desvio padrão como ideal, pois foi o que melhor representou as mudanças ocorridas.

TABELA 10 - QUANTIFICAÇÃO DA ÁREA DE EXPANSÃO DA MINERAÇÃO ENTRE 1987 E 1996.

	Imagem diferença TM3	Imagem diferença TM5	IIª componente principal TM3	IIª componente principal TM5
Desvio	Área/ha	Área/ha	Área/ha	Área/ha
0,50	43,56	36,18	46,17	44,91
0,75	35,00	27,27	35,64	36,90
1,0	27,72	21,42	28,44	29,61
1,25	22,50	16,556	22,95	24,66
1,50	17,00	13,23	14,67	18,45
*	31,00	31,00	31,00	31,00

\*Ampliação topográfica da área de mineração no período considerado em entrevista concedida por João Wilson Rodrigues PAES em 04 de março de 1997.

A quantificação das áreas de mudanças ilustrou a ampliação da mina, seja pelo avanço da frente de lavra propriamente dita, decapeamento ou por aumento dos depósitos de rejeitos.

MOORE *et al.* (1977), em trabalho de mapeamento de rejeitos de minas com imagens Landsat através de técnicas para classificação visual, classificaram os materiais superficiais em áreas de minas em quatro classes de rejeito: sobrecarga, abas, rejeitos de rochas e monte

de escombros, duas classes de águas, duas classes de cobertura vegetal e duas classes de instalações para mineração.

Durante o desenvolvimento do trabalho, observou-se que são muitas e diversas as dificuldades que se encontra ao se detectar atividades de expansão de mineração de calcário calcítico através de dados de sensoriamento remoto orbital, uma vez que o alvo em questão é extremamente variável quanto ao material envolvido e quanto a operação da mineração.

Para CARR e GLASS (1983) que afirmam que as técnicas mais efetivas para realizar inventários e monitoramentos de área exploradas por mineração, usando sistemas de satélites, é a classificação supervisionada com imagens multiespectrais de alta resolução, também a maior desvantagem inerente as técnicas de classificação supervisionada foi a necessidade de readaptar o classificador para cada mina e cada local.

Quando foi considerada a banda 3, esta caracterizou melhor os depósitos de rejeitos mais recentes, áreas de decape e avanço da frente de lavra, porém diferentemente na subtração simples de bandas e segunda componente principal.

Na banda 5 nos dois algoritmos foram melhor caracterizadas as áreas de rejeitos mais antigos e decapeamento, não caracterizando o avanço da frente de lavra.

Portanto, a quantificação dos pixels de mudanças nas duas técnicas precisa ser analisadas com cuidado, pois em cada banda foi realçado mais de um detalhe particular.

Com a utilização destas técnicas de detecção de mudanças foi possível a caracterização das mudanças ocorridas, porém cada banda identificou melhor uma mudança. Como exemplo, somente foi possível detectar o avanço da frente de lavra na banda TM3, nas duas técnicas utilizados.

No presente estudo, resultados precisos foram obtidos com a simples subtração de imagens para caracterização das áreas de perda/redução da vegetação. Todavia os resultados

foram mais precisos quando utilizou-se o procedimento da análise de componentes principais seletivas.

Como as imagens não foram calibradas, a melhor resposta considerando a banda 1M3 foi na segunda componente principal desta banda, pois o procedimento de análise por componentes principais seletivas aplica automaticamente uma calibração de primeira ordem às imagens, conforme explicado por (CHAVEZ e MACKINNON, 1994). Na aplicação do limiar de mudanças de um desvio padrão, este procedimento apresentou uma diferença de apenas 2,56 ha em relação a verdadeira área de mudança, conforme apresentado na tabela 8, caracterizando os pixels de mudança com uma precisão de 91%.

Na segunda componente da banda 5, a identificação das mudanças observadas foi também melhor do que na simples subtração de bandas. A segunda componente principal da banda 5 caracterizou melhor os depósitos de rejeitos a oeste da cota do que a banda 3. Após a aplicação do limiar de um desvio a área caracterizada foi de 29,61 ha, fornecendo uma precisão de 95% de caracterização correta. Porém devemos considerar que apesar da pequena diferença, 1,39 ha em relação a verdadeira área de mudanças, esta banda não detectou as mudanças ocorridas pelo avanço da frente de lavra. Portanto, esta maior precisão deu-se também pelos pixels que foram caracterizados erroneamente como mudanças no interior da imagem.

Em ambos os algoritmos de detecção de mudanças utilizados devemos olhar com cuidados os resultados da quantificação das áreas de mudanças encontradas, pois nem todos os pixels caracterizados como tal, significam mudanças.

#### 4.4 ROTULAÇÃO

Aplicando os critérios de detecção das áreas de mudanças no sentido de perda/redução da vegetação e com a aplicação dos limiares de mudanças não foi possível separar claramente as mudanças ocorridas, ou seja, separar as áreas de decapeamento, das áreas de avanço de lavra e aumento dos depósitos de rejeitos. Um dos fatores que dificultam por exemplo a separação entre as mudanças ocorridas pelo avanço da frente de lavra e aumento dos depósitos de rejeitos é a presença do minério em ambas as situações dando resposta espectralmente semelhantes para mudanças diferentes.

As imagens resultantes que apresentaram melhor caracterização e delineamento das mudanças ocorridas foram rotuladas, ilustrando as mudanças que ocorreram no sentido de perda/redução da vegetação nas figuras 29 e 30.

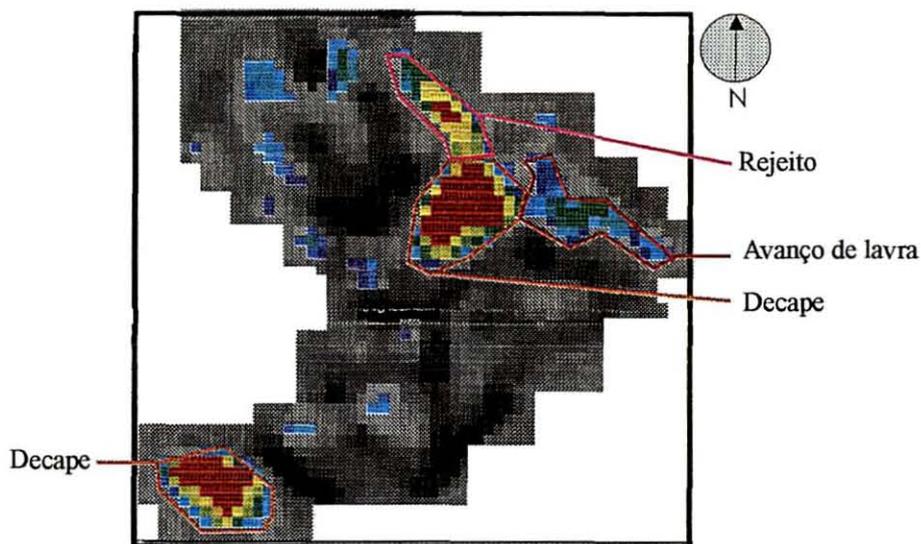


FIGURA 29 – ROTULAÇÃO DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM 3

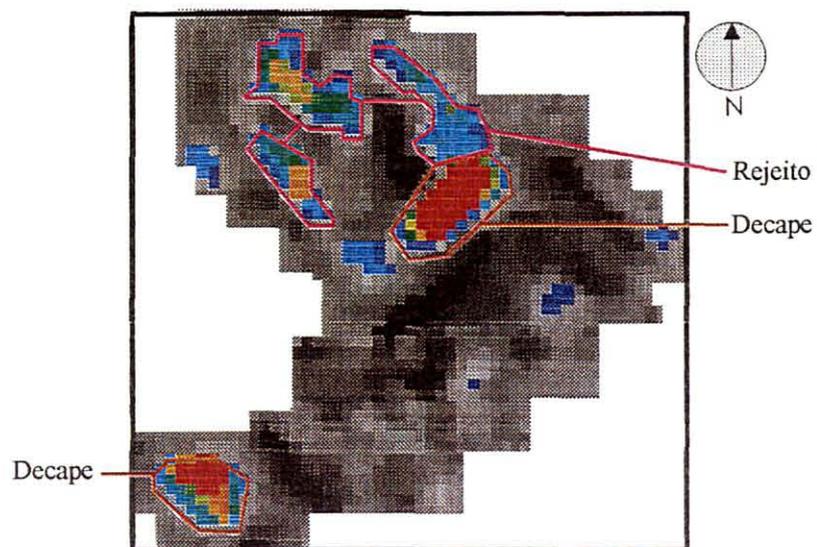


FIGURA 30 – ROTULAÇÃO DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM5.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

A detecção de mudanças da cobertura/uso da terra através da utilização de componentes principais seletivas apresentaram melhores resultados no delineamento das áreas de mudanças, quando comparada a subtração simples de bandas, oferecendo ainda a vantagem de dispensar o pré-processamento para correção radiométrica para o período e datas consideradas.

Quanto a contribuição das bandas (TM3 e TM5) para a detecção de mudanças, com base nos resultados obtidos, com a aplicação das técnicas de processamento utilizadas, concluiu-se que:

a) mediante a análise qualitativa (visual) das três imagens transformadas pela subtração de bandas, a banda 3 mostrou-se ligeiramente superior a banda 5 e a banda 4 foi a menos eficiente para a detecção de expansão de áreas de mineração de calcário calcítico pelo avanço da frente de lavra, aumento dos depósitos de rejeitos e decapeamento;

b) a banda 5 foi superior na caracterização dos depósitos de rejeitos mais antigos em razão de sua capacidade de detectar as regiões com maior presença de umidade.

c) na aplicação dos limiares de mudança, a utilização de um desvio padrão apresentou os melhores resultados, nas duas técnicas com a utilização das bandas TM3 e TM5;

d) a distribuição dos valores digitais dos polígonos de treinamento no gráfico referente a banda 3 caracterizou melhor as mudanças ocorridas em campo no sentido de perda/redução da vegetação.

d) os valores digitais médios dos polígonos de treinamento no gráfico referente a subtração da banda 5 caracterizaram melhor as mudanças que ocorreram na área de mineração no sentido de perda/redução da vegetação de maior porte e, quando da presença de umidade nos depósitos de rejeitos mais antigos.

Quanto a caracterização das mudanças no sentido de perda/redução da vegetação concluiu-se que:

foi possível identificar as intensidades de mudanças na cobertura do terreno, dentro das três classes de mudanças consideradas, mas não foi possível separar e caracterizar detalhadamente cada uma das mudanças ocorridas no sentido de avanço de lavra, decaimento e aumento dos depósitos de rejeitos em razão da resolução espectral das imagens utilizadas.

Quanto a caracterização das mudanças no sentido de ganho/recuperação da vegetação concluiu-se que:

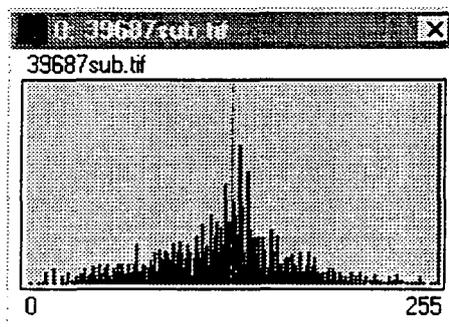
na análise semi-quantitativa utilizando a banda TM3 foi possível observar que os valores digitais médios dos polígonos de treinamento demonstravam indícios de existência de um processo em estágio inicial de recuperação florística dos depósitos de rejeitos mais antigos, confirmado em campo.

#### RECOMENDAÇÕES:

Devido às constantes inovações tecnológicas em sensoriamento remoto, recomendo a repetição das metodologias utilizadas neste trabalho associado a um modelo numérico de terreno e um refinamento da resolução espacial e espectral das imagens.

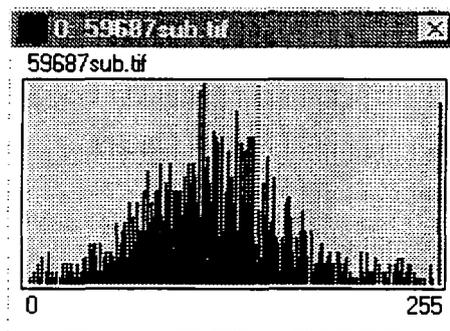
Para a detecção da ampliação de frentes de lavras de calcário calcítico, a utilização da análise por componentes principais seletiva com a banda TM3 é a mais recomendável. Para a detecção de processos de recomposição florística em depósitos de rejeitos é recomendado a utilização da mesma banda, com a técnica de subtração de bandas. Enquanto que, para uma melhor detecção do aumento dos depósitos de rejeitos recomenda-se utilizar análise por componentes principais seletiva com a banda TM5.

## Anexos



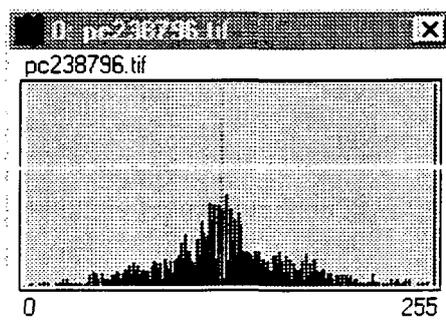
Média	moda	desvio padrão	mínimo	Máximo
126.40	127	39.38	0	255

### ANEXO 1 - HISTOGRAMA E ESTATÍSTICA DA BANDA TM3 TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS



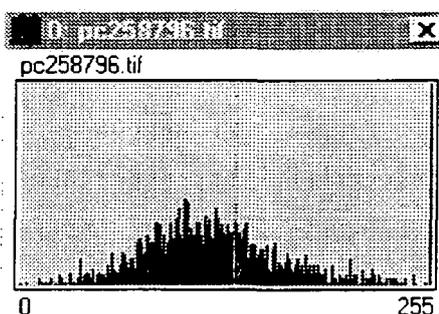
Média	moda	desvio padrão	mínimo	máximo
126.51	142	40.64	0	255

### ANEXO 2 - HISTOGRAMA E ESTATÍSTICA DA BANDA TM5 TRANSFORMADA PELA DIFERENÇA ENTRE BANDAS



Média	moda	desvio padrão	mínimo	máximo
126.52	124	38.88	0	255

ANEXO 3 – HISTOGRAMA E ESTATÍSTICA DA IMAGEM DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM 3.



Média	moda	desvio padrão	mínimo	máximo
126.74	129	39.24	0	255

ANEXO 4 - HISTOGRAMA E ESTATÍSTICA DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL DA BANDA TM 5

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFIFI, A.A.; CLARK, V. Computer aided multivariate analysis. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- AMARAL, G. Princípios de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO (1990 : Manaus). **Anais...** Manaus: [s.n], 1990. p. 27-36.
- BECKER, R.D. **Distribuição dos Sedimentos Cenozóicos da Região Metropolitana de Curitiba e sua Relação com a Estrutura Geológica e Morfológica Regional.** Biblioteca da UFPR - 1982.
- BELLO, M.L.S.; POUBEL, M.B.P.; LOPES, T.R.P. Construção da legenda de padrões de uso do solo a partir de produtos de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (7.: Curitiba: 1993). **Anais...** São José dos Campos. INPE, 1993. v. 4, p. 79-84.
- BILLINGSLEY, F. C. Digital processing and reprocessing. In: COLWELL, R. N. Ed. **Manual of Remote Sensing.** 2. ed. Falls Church: A. S. P., 1983. v. 1, p. 719-792.
- BYRNE, G. F. ; CRAPPER, P. F. ; MAYO, K. K. Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. **Remote Sensing of Environment,** New York, v. 10, p 175- 184, 1980.
- CARR, J. R.; GLASS, E. C. Signature extension versus retraining for multispectral classification of surface mines in arid regions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,** Falls Church, v. 49, n. 8, p. 1193-1199, 1983.
- CARRILHO, J.M.Z. de F. **Detecção de mudanças da cobertura do terreno em uma região de cerrado.** São José dos Campos. 1996. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- CHAVEZ JUNIOR, P. S. Extrating spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,** Falls Church, v. 55, n. 3, p. 339-348, 1989.
- CHAVEZ, P. S; MACKINNON, D. J. Automatic detection of vegetation changes in Southwestern United States using remotely sensed images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,** Falls Church, v. 32. n. 5, p. 571-583, 1994.
- CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas: UNICAMP, 1992.
- DIAS, M. V. F. **O perfil do mercado produtor de areia, brita, argila, calcário dolomítico, calcário e talco no estado do Paraná.** Curitiba: MINEROPAR, 1992.

- EASTMAN, J. R. **Idrisi for Windows: user's guide**. Worcester: Clark University, 1995.
- EASTMAN, J. R.; FULK, M. Long sequence time series evaluation using standardized principal components. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 59, n. 6, p. 991-996, 1993.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento de reconhecimento de solos do Estado do Paraná**. EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR. 1984, (Boletim de pesquisa, 27).
- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. de M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do estado do de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992.
- ESTES, J. E.; HAJIC, E. J.; TINNEY, L. R. Fundamentals of image analysis: analysis of visible and thermal infrared data. In: COLWELL, R. N. (Ed). **Manual of Remote Sensing**. 2. ed. Falls Church: 1983, v. 1, p. 987-1124.
- FERREIRA JR., L. G., ASSAD E. D.; BEZZERA, H.; MOREIRA, L. Evaluation of conventional and contextual classification techniques to assess land cover and land use in multispectral images. In: SYMPOSIUM: RESOURCE AND ENVIRONMENTAL MONITORING, ISPRS Comission VII (Rio de Janeiro:1994). **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 1994. v. 30. p. 32.
- FORSHAW, M. R. B.; HASKELL, A.; MILLER, P. F.; STANLEY, D. J.; TOWNSHEND, J. R. G. Spatial resolution of remotely sensed imagery: a review paper. **Internacional Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 4, n. 3. p. 497-520, 1983.
- FUNG, T.; LEDREW, E. Application of principal components analysis to change detection. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 53, n. 12, p. 1649-1658, Dec. 1987.
- GARCIA, G. J. **Sensoriamento remoto: princípios e interpretação de imagens**. São Paulo: Nobel, 1982.
- GREEN, K.; KEMPLA, D.; LACKEY, L. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land use change. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 60, n. 3, p. 331-337, 1994.
- HOFFER, R. G. Biological and physical considerations in applying computer aided analysis techniques to remote sensed data. In: SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. **Remote sensing: the quantitative approach**: New York: McGraw-Hill, 1978. p. 276.
- IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de geociências. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, 1992. (Série manuais técnicos em geociências, 01).

IPARDES. INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Meio Ambiente e Recursos Naturais da Região Metropolitana de Curitiba**, 1979.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing**. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.

JIAJU, L. Development of principal component analysis applied to multitemporal Landsat TM data. **International Journal of Remote Sensing**, New Hampshire, v. 9, n. 12, p. 1895-1907, 1988.

KIMES, D. S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. **Applied Optics**, v. 22, n. 9, 1364-1372, 1983.

KUMAR, R. **Radiation from plants, reflection and emission: a review**. Lafayette: Purdue Research Foundation, 1972.

LEE, D. C. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; HERNANDEZ FILHO, P. Análise de componentes principais para o monitoramento de áreas reflorestadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (6.: 1990: Manaus). **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1990. v. 1, p. 48-60.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 2. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1981.

MATHER, P. M. **Computer processing of remote sensed images: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

MEDEIROS, J.S. **Desenvolvimento metodológico para detecção de alterações da cobertura vegetal através da análise de dados MSS Landsat**. São José dos Campos, 1987. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

MOORE, H.D.; ADAMS J. H.; GREGORY, A. F. Cartographie des dechets de mines au moyen d'images Landsat. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING (4.: 1977: Ottawa). **Proceedings...** Quebec: Institut Aeronautiques et Spatial du Canada, 1977. v. 1, p. 294-304.

MUCHONEY, D. M.; HAACK, B. N. Change detection for monitoring forest defoliation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 60, n. 10, p. 1243-1251, 1994.

MYERS, V. I. Remote sensing applications in agriculture. In: COLWELL, R. N. Ed. **Manual of Remote Sensing**, 2. ed. Falls Church: 1983, v. 2, p. 2111- 2228.

- NELSON, R. F. **Detecting forest canopy change using Landsat**: final report. Greenbelt: Goddard Space Flight Centre, NASA, 1982.
- NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1989.
- PARADELLA, W.R. **Introdução ao processamento digital de imagens de sensoriamento remoto aplicados à geologia**. São José dos Campos: INPE, 1989.
- PEREIRA, M.N.; KURDJAN, M.L.N.O.; FORESTI, C. **Cobertura e uso da terra através de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 1989.
- PEREIRA NETO, O. C. **Técnicas de geoprocessamento aplicadas no estudo da adequação do uso do solo em bacias hidrográficas**. São José dos Campos, 1994. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- PONZONI, F.; NOVO, E. M. L. M.; PARADELLA, W. R.; FORMAGGIO, A. R. **Comportamento espectral de alvos**. Notas de aula dadas no curso de mestrado em sensoriamento remoto do INPE, São José dos Campos, 2. Sem., 1994. Manuscrito e fotocopiado.
- RICHARDS, A. J. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2.ed. Berlim: Springer – Verlag, 1986.
- RUDORF, B. F. T.; TARDIN, A. T. Fotografias aéreas para auxiliar o processo de fiscalização do crédito agrícola na região de Irecê – BA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (1988: Natal). **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1988. v. 1, p. 139- 148.
- SABINS JR, F.F. **Remote sensing: principles and interpretation**. New York: W.H. Freeman, 1987.
- SALAMUNI, R.; BIGARELLA, J. J. Contribuição à geologia do Grupo Açungui. **Boletim da UFPR**, n. 23, abril. 1967.
- SANO, E. E. **Curso de introdução ao sensoriamento remoto aplicado à recursos naturais**. Manaus: SUDAM, 1988.
- SANTOS, A. P.; FORESTI, C.; NOVO, E. M. L. M.; NIERO, M.; LOMBARDO, M. A. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações no uso da terra**. São José dos Campos: INPE, 1981. 61 p.
- SHEPARD, J. R. A concept of change detection. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 30, n. 7, p. 648 – 651, 1964.
- SHOWENGERDT, R. A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. Orlando: Academic Press, 1983.

- SILVEIRA, P. **Detecção de alterações na cobertura vegetal ocasionadas pela expansão urbana em uma região do litoral paranaense através de técnicas de sensoriamento remoto.** Curitiba, 1997. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná.
- SOARES, V. P. **Landsat Thematic Mapper and C-band radar satellite data to characterize *Eucalyptus* forest plantations in Brazil.** Fort Collins, 1994. Tese (Doutorado), Colorado State University.
- SOARES, V.P.; HOFFER, R. M. Detecção de mudanças em povoamentos de *Eucalyptus spp* e outros usos da terra através de imagens TM/Landsat-5 na região do Vale do Rio Doce – MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n.1, p. 117- 127, 1996.
- STAUFFER, M. L.; MCKINNEY, R. L. Landsat image differencing as an automated land cover change detection technique (interim report). Greenbelt: Goddard Space Flight Centre, NASA, 1987.
- VALERIANO. D. de M. Sensoriamento remoto aplicado no monitoramento de extração mineral em proximidade de áreas urbanas: prós e contras. In: ENCONTRO NACIONAL DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO PLANEJAMENTO MUNICIPAL (1987: Campos do Jordão). **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1987. p. 200 – 210.
- VETORAZZI, C. A. Técnicas de geoprocessamento no monitoramento de áreas florestadas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 10, n. 29, p. 45-51, 1996.
- VOGELMANN. J. E.; ROCK, B. N. Assessing forest decline in coniferous forests of Vermont using NS-001 Thematic Mapper simulator data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 7, p. 1303 – 1321, 1986.
- WATRIN, O. S. **Estudo da dinâmica na paisagem da Amazônia Oriental através de técnicas de geoprocessamento.** São José dos Campos, 1994. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto ) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- WHEATE, R. D.; FRANKLIN, S.E. Principal component transformation of satellite imagery in mountain areas. 14 th Symposium or Remote Sensng. 1987.
- WILLIAMS JR., R. S. Geological applications. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **Manual of remote sensing.** 2.ed. Falls Church. 1983. v. 2, p. 1667-1953.