



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12679-TDI/1007

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA METODOLOGIA
DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS NA COBERTURA VEGETAL
DO SEMI-ÁRIDO**

Francisco Darío Maldonado

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. João Roberto dos Santos, aprovada em 22 de outubro de 2004.

528.711.7 (813.4 A/Z) (825.2)

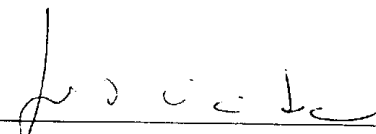
MALDONADO, F. D.

Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semi-árido / F. D. Maldonado. – São José dos Campos: INPE, 2004. 311p. – (INPE-12679-TDI/1007).

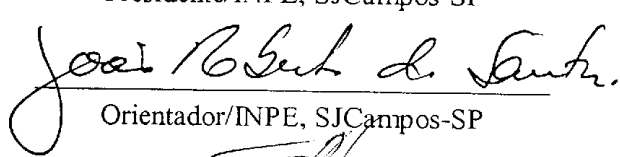
1.Novas técnicas. 2.Detecção de mudanças.
3.Monitoramento ambiental. 4.Terras áridas.
5.Sensoriamento remoto. 6.Quixaba (PE). 7.San Juan (Argentina). I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para a obtenção do Título de **Doutor** em **Sensoriamento Remoto**.

Dr. João Vianei Soares


Presidente/INPE, SJCampos-SP

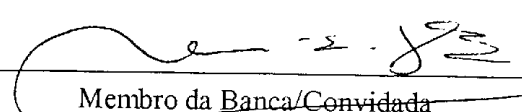
Dr. João Roberto dos Santos


Orientador/INPE, SJCampos-SP

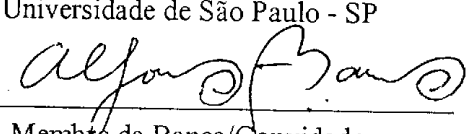
Dr. Antônio Roberto Formaggio


Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

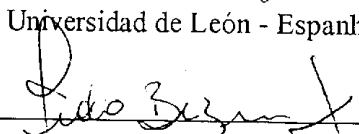
Dra. Marisa Dantas Bitencourt


Membro da Banca/Convidada
Universidade de São Paulo - SP

Dr. Antonio Alfonso Fernández Manso


Membro da Banca/Convidado
Universidad de León - Espanha

Dr. Iêdo Bezerra Sá


Membro da Banca/Convidado
CPATSA/EMBRAPA

Aluno: Francisco Dario Maldonado

São José dos Campos, 22 de outubro de 2004.

*Si falta el principio del desorden,
el vivificante aborresimiento del orden,
ninguna disciplina liberadora,
puede ser o ver la luz de un nuevo día.*

David

Cooper

AGRADECIMENTOS

Ao Orientador Dr. João Roberto dos Santos, pelas discussões e sugestões no decorrer da tese, sobretudo pela inestimável ajuda na redação final deste trabalho.

Ao colega Paulo de Alencastro Graça (INPA-AM), pelo companherismo e grande apoio científico durante o desenvolvimento do trabalho e parceria na produção técnica.

Ao colega e Mestre Clerio Lemos de Sousa, pela amizade e pela ajuda na fase da coleta de dados de campo, e também ao Sr. Francisco Alexandrino Gomes, auxiliar de campo ligado a ONG CAATINGA, de Ouricuri (PE).

Aos Professores Dr. Flávio Jorge Ponzoni, Dr. Antonio Roberto Formaggio, Dr. Nelson Jesus Ferreira, Dr. Hermann Kux, Dr. Bernardo e Dr. Epiphanio, pelas sugestões e críticas dadas em diversas fases da minha formação acadêmica.

À Coordenadora do curso de Pós-graduação Dr. Evelyn e a todos os demais professores do corpo docente.

Às queridas Etel e Angelucci que tanto me ajudaram com dedicação e bom humor.

Aos amigos Enzo, Rizzi, Marinaldo, Aragão, Fabrício e Silvia, pelas numerosas discussões informais acompanhadas de chimarão na famosa sala dos doutorandos.

A meus queridos pais que sempre me incentivaram para que eu continuasse até aqui.

E especialmente a Isabel Cristina Vega de Maldonado, que ajudou com paciência e carinho em todas as etapas da execução deste trabalho.

Aos seguintes organismos pelo financiamento deste estudo: CAPES pela concessão da Bolsa PECPG\CAPES (Processo 0050008/2000); “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP/Brasil” que financiou o levantamento de campo através do “Projeto Regular de Auxílio à Pesquisa (FAPESP nº 02/0322-3)”.

Ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pela ministração do curso e apoio.

À UNSJ (Universidad Nacional de San Juan - Argentina) pela licença e apoio administrativo nos primeiros anos deste doutorado.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para detecção de mudanças na cobertura vegetal do semiárido, utilizando imagens multitemporais do TM/Landsat, na banda espectral do vermelho. Para implementar operacionalmente esta metodologia foram desenvolvidas duas técnicas digitais, que não precisam fazer uso de imagens com correção atmosférica, para a geração dos mapas de mudanças. A abordagem empregada faz uso do conceito simples do “eixo radiométrico de não mudança”, o qual permite controlar o algoritmo digital de detecção de mudanças, utilizando informações de campo para as amostras rotuladas. Estas técnicas foram chamadas de Rotação radiométrica controlada por eixo de não mudança (RCEN) e Rotação radiométrica controlada por índice de acurácia (RCIA). Estas técnicas extraem das imagens multitemporais os valores radiométricos das amostras, estabelecendo parâmetros que permitem rotacionar a radiometria das imagens, para gerar a imagem detecção de mudanças. Posteriormente é feito um fatiamento e rotulação dessa imagem detecção que, baseados em informações de campo, permitem gerar o mapa final de mudanças. Para validar a capacidade dessas técnicas foi feita uma comparação com os resultados das técnicas Diferença simples e Análise por componentes principais (ACP). As áreas selecionadas para este estudo estão situadas na região central do trópico semiárido brasileiro (Quixaba-PE) com análise em três distintos períodos entre 1984 e 2001 e, na região centro-oeste do semiárido argentino (Valle Fértil - San Juan), no período de 1987-2001. Quatro classes de mudanças e uma de não mudança foram definidas nessa análise multitemporal, cuja acurácia temática foi avaliada através da matriz de confusão e análise Kappa. A técnica RCEN foi aquela que obteve os resultados mais consistentes (acurácia total > 87% e índice K > 0.70 em valores médios), mantendo significativo desempenho em todos os intervalos de tempo investigados. O procedimento metodológico desenvolvido neste trabalho diminui a complexidade do processamento digital de imagens, além de permitir a espacialização da dinâmica de uso e cobertura da terra na região do semi-árido. A cartografia dessas mudanças é extremamente necessária ao planejamento de uso e conservação dos recursos naturais da região denominada “diagonal semi-árida sul-americana”.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A METHODOLOGY FOR DETECTION OF CHANGES IN THE VEGETAL COVER OF THE SEMI-ARID ONE

ABSTRACT

In this work a methodology for the change detection in vegetation cover of semi-arid region was developed, using multi-temporal images of TM\Landsat, in the red spectral band. In order to implement operationally this methodology two digital techniques were developed. These techniques do not need to make use of images with atmospheric correction for the generation of change maps. We used the simple concept of "radiometric axis of no change", which allows to control the digital algorithm of change detection, using field information for the labeled samples. These techniques were called "Radiometric Rotation Controlled by Axis of No Change" (RCEN) and "Radiometric Rotation Controlled by Accuracy Index" (RCIA). These techniques extract samples of radiometric values from multi-temporal images, establishing parameters that allow rotating the radiometric values of the images, to generate the change detection image. Afterwards a slicing is made and labeled from the detected image, what, on the basis of field information, allows the generation of a final map of changes. In order to validate the capacity of those techniques it was made a comparison results from the Simple difference with the Principal Components Analysis (PCA). The selected areas for this study are located in the central region of the Brazilian semi-arid tropic (Quixaba-PE) (these different periods were analysed between 1984 and 2001) and in the center-west region of the Argentinean semi-arid (*Valle Fértil* - San Juan), in the timeframe of 1987-2001. Four classes of changes and one of no-change were defined in this multi-temporal analysis, and the thematic accuracy was evaluated, considering the matrix of confusion and *Kappa* analysis. Consistent results were obtained with the RCEN technique (total accuracy > 87% and *K* index > 0.70 in average), maintaining significant performance in all the investigated time intervals. The methodology developed in this thesis reduces the complexity of the digital procedure of images, and that it besides that it allow to the spatial representation on dynamics of use and land cover, in the semi-arid region. The cartography of these changes is extremely necessary to the planning of land use and conservation of the natural resources of the so-called region "South American semi-arid diagonal".

SUMÁRIO

pág.

LISTA DE FIGURAS	16
LISTA DE TABELAS	21
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO E MATERIAIS	23
1.1. Introdução	23
1.1.1. Apresentação da organização da tese	24
1.2. Fundamentação teórica	25
1.2.1. Análise das similaridades Fisionômico-estruturais, Climáticas e Edáficas das áreas de interesse	26
1.2.2. Características espectrais da vegetação da região semi-árida	30
1.2.2.1. Influência dos solos no comportamento espectral do ambiente	33
1.2.2.2. Influência da sazonalidade no comportamento espectral da vegetação da região semi-árida	35
1.2.2.3. Indicadores para análise do processo de degradação da cobertura vegetal através de sensoriamento remoto, com ênfase no semi-árido	38
1.2.2.3.1. Indicadores espectrais da vegetação	41
1.2.2.3.2. Indicadores específicos do comportamento radiométrico multiespectral	42
1.2.3. Indicadores de mudanças	43
1.2.4. Principais aspectos radiométricos das imagens ópticas orbitais	50
1.2.5. Técnicas de Pré-Processamento	54
1.2.5.1. Correção radiométrica	55

1.2.5.2. Correção dos efeitos atmosféricos.....	57
1.2.5.2.1. O processo de espalhamento atmosférico.....	60
1.2.5.2.2. O processo de absorção atmosférica.....	62
1.2.5.3. Efeito das correções sobre os índices de vegetação	64
1.2.5.4. Correção geométrica.....	65
1.2.6. Técnicas de Detecção de Mudanças para estudo da paisagem.....	66
1.2.6.1. Detecção de mudanças por composição multitemporal	67
1.2.6.2. Detecção de mudanças por álgebra de imagens	67
1.2.6.3. Análise por Componentes Principais - ACP.....	71
1.2.6.4. Rotação radiométrica controlada por eixo da não mudança-RCEN.....	75
1.2.7. Experiências de uso das imagens orbitais em estudos da cobertura vegetal e uso da terra no semi-árido.....	77
1.2.8. Obtenção da acuracia do mapeamento por Análise Kappa	79
1.2.9. Técnicas de Amostragem.....	81
1.3. Descrição das áreas de estudo	83
1.3.1. Fisionomia e estrutura da Caatinga e do Chaco árido	86
1.3.1.1. Fisionomia aclareirada.....	87
1.3.1.2. Fisionomia Arbórea-arbustiva	88
1.3.1.3. Fisionomia Arbórea aberta	89
1.3.1.4. Fisionomia Arbórea	90
1.3.1.5. Fisionomia em Galeria.....	91
1.3.1.6. Fisionomia Agrícola	91
1.3.1.7. Solo nu.....	95
1.3.1.8. Outras fisionomias.....	97
1.4. Materiais	98
1.4.1. Materiais cartográficos e Imagens orbitais.....	98
1.4.1.1. Imagens.....	98
1.4.1.2. Base cartográfica	99
1.4.1.3. Suporte temático	99
1.4.2. Software.....	100
1.5. Considerações gerais	100

CAPÍTULO 2 - MONTAGEM DO BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADOS ...	103
2.1. Montagem do banco de dados georreferenciados.....	103
2.1.1. Seleção dos materiais	103
2.1.2. Incorporação dos materiais.....	104
2.1.3. Banco de Dados Georreferenciados	106
2.2. Resultados.....	107
2.3. Conclusões e Recomendações.....	112
CAPÍTULO 3 - APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REFERÊNCIA PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS.....	113
3.1. Introdução.....	113
3.2. Procedimento metodológico da aplicação das Técnicas de referência para Detecção de mudanças	113
3.2.1. Técnica de detecção por diferença entre bandas	115
3.2.2. Técnica de detecção através da análise por componentes principais – ACP.....	115
3.2.3. Fatiamento e rotulação da diferença e da ACP	115
3.3. Resultados da aplicação das Técnicas de referência	118
3.3.1. Resultados da diferença entre bandas.....	118
3.3.2. Resultados da ACP	123
3.4. Conclusões e recomendações do Capítulo	128
CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE LEVANTAMENTO DE CAMPO	131
4.1. Introdução.....	131
4.2. Procedimento metodológico do Levantamento de campo.....	132
4.2.1. Delineamento amostral: Amostragem Não Aleatória Seletiva.....	134
4.2.2. Decisão da forma de amostragem.....	135
4.2.2.1. Determinação do tipo de fisionomia.....	136
4.2.2.2. Determinação do tipo de recuperação/degradação	138
4.2.3. <i>Transecto</i> em linha	139

4.2.4. Descrição fitofisionômica.....	147
4.2.5. Ponto observacional.....	148
4.2.6. Análise e rotulação das amostras.....	149
4.2.7. Análise e ponderação da confiabilidade da rotulação	155
4.3. Resultados e Discussão.....	157
4.3.1. Análise e rotulação das amostras.....	161
4.3.1.1. Transectos.....	161
4.3.1.2. Descrição fitofisionômica simples	162
4.3.1.3. Pontos observacionais	164
4.3.1.4. Sistematização das informações dos <i>transectos</i> para rotulação	166
4.3.2. Análise e ponderação da confiabilidade da rotulação	172
4.4. Conclusões e Recomendações.....	175
CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DESENVOLVIDAS PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS	177
5.1. Introdução.....	177
5.2. Materiais.....	178
5.3. Procedimento metodológico para a aplicação das técnicas desenvolvidas	178
5.3.1. Aplicação da técnica de rotação controlada por eixo de não mudança (RCEN).....	178
5.3.1.1. Imagem multitemporal radiância.....	179
5.3.1.2. Regressão da radiância das amostras.....	180
5.3.1.3. Rotação controlada	180
5.3.1.4. Fatiamento e rotulação	181
5.3.2. Aplicação da técnica de Rotação controlada por índice de acurácia (RCIA).....	183
5.3.2.1. Imagens multitemporais em radiância.....	185
5.3.2.2. Rotação controlada	185
5.3.2.3. Fatiamento e rotulação	185
5.3.2.4. Geração da matriz de confusão e cálculo do índice de acurácia do mapeamento ..	186
5.3.2.5. Avaliação dos índices K das iterações.....	187
5.4. Resultados e Discussão.....	187

5.4.1. Resultados da RCEN	187
5.4.2. Mapas de Mudanças da RCIA	195
5.5. Conclusões e Recomendações	198
CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DOS DADOS E SÍNTESE METODOLÓGICA	201
6.1. Introdução	201
6.2. Material e Método	201
6.2.1. Matriz de confusão	202
6.2.2. Análise Kappa da matriz de confusão	203
6.2.3. Teste de significância com uso da estatística Z	204
6.3. Resultados da avaliação	205
6.3.1. Matrizes de confusão e Índices K e Z das Diferenças entre bandas	205
6.3.2. Matrizes de confusão e índices K e Z das ACP	208
6.3.3. Matrizes de confusão e índices K e Z da RCEN	212
6.3.4. Matriz de confusão e índice K e Z da técnica RCIA	215
6.3.5. Análise comparativa	216
6.4. Conclusões e Recomendações	220
6.5. Síntese Metodológica	220
CAPÍTULO 7 - TESTE DA METODOLOGIA: ESTUDO DE CASO VALLE FÉRTIL (ARGENTINA)	225
7.1. Introdução	225
7.2. Área de estudo	226
7.3. Materiais	228
7.4. Método	233
7.5. Resultados e discussão	235
7.5.1. Resultado da estratificação da amostragem	237
7.5.2. Resultado da aplicação da Rotação controlada por eixo de não-mudança – RCEN	240
7.5.3. Resultado do fatiamento e rotulação	242

7.6. Conclusões e Recomendações.....	251
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	253
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	257
APÊNDICE A - LISTA DE NOMES VULGARES E CIENTÍFICOS DAS ESPECIES ENCONTRADAS NA CAATINGA DE QUIXABA.....	281
APÊNDICE B - LISTA DE NOMES VULGARES E CIENTÍFICOS DAS ESPECIES ENCONTRADAS NO CHACO ARIDO DE VALLE FÉRTIL.....	285
APÊNDICE C – PUBLICAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA LONGITUDE DO TRANSECTO.....	287
APÊNDICE D - DADOS DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS DO ANO 1984, DE MAIO ATÉ OUTUBRO.....	303
GLOSSÁRIO.....	305
ÍNDICE DE AUTORES.....	307

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1.1 - Isolinhas do índice de aridez calculadas a partir de dados meteorológicos interanuais.....	27
1.2. - Diagrama ombrotérmico representativo das regiões de interesse (a) semi-árido brasileiro e (b) semi-árido argentino.	28
1.3 - Comportamento espectral característico da folha verde.	31
1.4 - Resposta espectral característica da vegetação verde, solo arenoso e solo argiloso em condições úmida e seca, sobrepostas nas bandas Landsat TM.	34
1.5 - Estimativa do comportamento das bandas TM3 e banda TM4 na época seca e época úmida.	37
1.6 - Gráfico de participação de cada elemento da paisagem na resposta radiométrica do sítio, segundo o comprimento de onda.	38
1.7 - Diagrama das mudanças radiométricas na faixa visível para áreas arbóreo-arbustivas submetidas às transformações de uso e cobertura das terras (roçados, pastoreio, corte, etc).....	44
1.8 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de neossolos.	46
1.9 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de luvisolos.	47
1.10 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de planossolos.	48
1.11 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de argissolos e similares.....	49
1.12 - Elementos de uma imagem (pixels) e esquema do reescalonamento radiométrico para dados de 7 e 8 bit.....	52
1.13 - Esquema do sinal emitido pelo sensor e resultados do reescalonamento: a) sinal analógico; b) 2 níveis com 1 bit, c) 4 níveis com 2 bit; e d) 8 níveis com 3 bit.....	53
1.14 - Conversão de números digitais para reflectância ao nível do terreno.....	56
1.15 - Efeito da atmosfera sobre os níveis de cinza das três bandas TM/Landsat do visível; a) simples efeito aditivo; e b) efeito real (combinação de aditivo e multiplicativo).	59
1.16 - Efeito da atmosfera sobre a natureza da REM incidente.	63
1.17 - Roteiro da técnica de diferença simples.	69
1.18 - Distribuição hipotética do espaço de pixels para duas datas TM/Landsat com a banda 3 (região do vermelho).	72
1.19 - Diagrama analítico das medidas para obter os parâmetros da rotação.....	76
1.20 - Áreas de estudo nas terras secas sul-americanas.....	84
1.21 - Localização da área de estudo de Ouricuri na região do sertão do Estado de Pernambuco.	85
1.22 - Localização da área de teste de Valle Fértil na região do Chaco árido.....	86
1.23 – Fotografia do bosque misto (Fisionomia Arbórea-arbustiva aclareirada) de Valle Fértil-Argentina.	89
1.24 – Espaço agrícola na época seca na região de Ouricuri.....	92
1.25 - Cultura de palma (Opuntia ficus-indica) na caatinga de Ouricuri-PE.	94
1.26 – Clareira em área de fisionomia predominantemente arbustiva, com superfície compactada e levemente salinizada, em Valle Fértil-Argentina.	96
1.27 – Depressão salina no leste da área de Valle Fértil, Argentina.	97

1.28 – Fluxograma metodológico geral da pesquisa	101
2.1 - Fluxograma da fase de estruturação	103
2.2 – Estruturação do projeto do banco de dados georreferenciados.	106
2.3 – Histogramas dos ND das imagens de órbita 217/066 de Ouricuri. (a) TM3; (b) TM4 (c)TM5.....	108
2.4 – Histogramas dos ND das imagens de órbita 217/066 de Ouricuri. Note-se que as duas imagens ETM possuem curvas mais suaves que as duas TM da anterior. (a) TM3; (b) TM4 (c)TM5.	109
2.5 – Histogramas dos NC das imagens 266/081 de Valle Fértil. (a) TM3; (b) TM4 (c)TM5.....	110
2.6 - Açude do qual foi extraído um valor de pixel escuro. Embora este seja de mais de 200m de comprimento freqüentemente seca, dificultando a correção atmosférica simples nas terras secas.....	111
3.1 - Aplicação das técnicas de referência para detecção de mudanças.	114
3.2 – Histogramas e fatiamento da imagem detecção; a) simétrica b) assimétrica de período de detecção curto, geralmente no semi-árido menor a 5 anos.....	116
3.3. – Detecção por diferença simples 1984 até 2001. (a) Mapa de mudanças; (b) histograma da imagem detecção; e (c) Diagrama de proporções.....	120
3.4. – Imagem detecção por diferença simples de 1996 até 2001, e a moda máxima de não mudança da imagem detecção.....	121
3.5. - Detecção por diferença simples de 1999 até 2001. a) Carta das mudanças; b) histograma da imagem detecção e moda máxima de não mudança; c) proporção de classes do mapa de detecção de mudanças.....	122
3.6. – Mapa das mudanças obtido pela ACP para o período 1984 / 2001.....	124
3.7. – Mapa de mudanças obtido pela ACP para o período 1996 / 2001.	125
3.8 – Exemplo de rotação excessiva aplicada pela ACP em área do semi-árido.	126
3.9 - Carta das mudanças obtido pela ACP para o período 1999 / 2001.....	127
3.10 - Diagramas circulares das proporções entre classe para a ACP. (a) entre 1984 até 2001; (b) entre 1996 até 2001; e (c) entre 1999 até 2001.....	128
4.1 – Fluxograma do procedimento do levantamento de campo.....	133
4.2 – Carta dos tipos estruturais de caatinga para a área de Quixaba. FONTE: Carvalho (1986).....	137
4.3 – Ilustração da aplicação de um transecto em linha.	140
4.4 - Planilha de amostragem para o levantamento por transectos.....	142
4.5 - Representação esquemática de um transecto, onde são representados os estratos com três substratos, a serrapilheira em amarelo, e a superfície exposta do solo em vermelho.	144
4.6 - Fotografia de um ponto amostral sobre a trena. Nota-se a superfície do solo coberta completamente por galhos e serrapilheira.	145
4.7 - Aplicação da amostragem em área de caatinga arbustiva aberta.	147
4.8 – Documentação das fotografias tomadas nos pontos observacionais.	149
4.9 – Representação esquemática de um transecto, onde são observadas a estrutura horizontal e a vertical.	150
4.10 - Diagrama proporcional de um sítio amostral onde o eixo horizontal é a porcentagem de cobertura.....	150

4.11 – Aproximação gráfica para a rotulação de mudanças na área de Ouricuri, segundo a variação de cobertura total, a fisionomia atual, o intervalo entre imagens e em consonância com o comportamento radiométrico das imagens TM\Landsat.	153
4.12 – Diagrama de um transecto de 50m sobre uma imagem TM com pixel de 30x30m (a); esquema dos 9 pixels amostrados para avaliar a variância da vizinhança (b).	155
4.13 – Divisão da área em 6 estratos para a “Amostragem não aleatória seletiva”, sobre composição de bandas PC2PC3Banda3 de 2000.....	158
4.14 - Amostragem na área de Quixaba, sobre a imagem fusão de 2002 B453/Pan, em vermelho transectos, em cores azuis os pontos observacionais.....	160
4.15 – Representação gráfica de um transecto que exemplifica a caatinga arbórea-arbustiva.	162
4.16 – Aspecto de caatinga arbórea-arbustiva descontínua, degradada pelo processo de queima no ano de 1987.	163
4.17 - Croquis do levantamento de um ponto observacional. As duas fotografias são individualizadas, no campo, pelo ponto do GPS e o rumo da visada da foto.....	165
4.18 – Diagrama do transecto em caatinga arbórea arbustiva descontínua (8% de solo nu).	167
4.19 – Diagrama do transecto em caatinga arbóreo-arbustiva contínua (2 % solo nu).	167
4.20 – Diagrama do transecto em caatinga arbustiva contínua (98% de cobertura total).....	169
4.21 – Diagrama do transecto em caatinga aclareirada arbóreo-arbustiva, com a representação da serrapilheira para indicar a degradação.	169
4.22 – Diagrama das proporções da cobertura vegetal por estratos em caatinga arbóreo-arbustiva.....	170
4.23 – Diagrama das proporções da cobertura vegetal por estratos em complexo arbustivo.	171
4.24 - Diagrama das proporções da cobertura vegetal por estratos em caatinga esparsa muito degradada.....	171
4.25 – Sítios amostrados de alta (a) e baixa (b) heterogeneidade radiométrica em imagem TM\Landsat.	173
4.26 – Sítio amostrado em área de recuperação. (a) ponto sobre a imagem da última data; e (b) diagrama do transecto em caatinga arbórea-arbustiva.	173
4.27 - Boxplot da variância dos pixels vizinhos do ponto amostrado por transectos.....	175
5.1 – Fluxograma explicativo do funcionamento da técnica RCEN.	179
5.2 – Distribuição da radiância dos grupos de amostras na imagem detecção.....	183
5.3 - Fluxograma de funcionamento da RCIA.	184
5.4 – Painel de controle para definição do eixo de não mudança para as imagens TM3/ETM3 do intervalo 1984/2001.	188
5.5 - Mapa das mudanças RCEN 1984/2001.....	189
5.6 - Painel de controle da definição do eixo de não mudança para o intervalo 1996/2001.	190
5.7- Mapa de mudanças RCEN 1996/2001	191
5.8 - Painel de controle da definição do eixo de não mudança para o intervalo entre as imagens 1999/2001.	193

5.9 - Mapa de mudanças RCEN 1999/2001	194
5.10 - Evolução da forma do histograma da imagem detecção e dos valores índice K ao longo da rotação da RCIA.	196
5.11 - Mapa de mudanças RCIA 1984/2001	197
6.1. – Esquema para a análise da matriz de confusão	202
6.2 - Par nuvem/sombra ou par açude/área superpastoreada na entrada do açude.	212
6.3 - Diagrama comparativo dos desempenhos das técnicas na região do semi-árido, segundo os diversos intervalos de tempo.	219
6.4 - Fluxograma resultante da síntese metodológica deste trabalho.	222
7.1- Área de estudo no semi-árido do centro-oeste da Argentina.	228
7.2 - Plano de informação temático das fisionomias da vegetação da área de Valle Fértil, utilizado para guiar a rotulação das amostras.	229
7.3 – Planilha de campo utilizada no modo transecto em linha, correspondente à porção da trena de 0 até 25m. Uma segunda folha foi empregada para aquisição de informação na porção da de 25 até 50m.	230
7.4 – Planilha de campo usada para o levantamento fito-fisionômico simples.	231
7.5 - Fluxograma da metodologia testada em Valle Fértil (Argentina).	233
7.6 - Imagem composição colorida ano 2000 da área de estudo (bandas TM4, TM5 e TM3) em Valle Fértil.	236
7.7- Estratificação da área de Valle Fértil segundo a delimitação visual da composição colorida PC2PC3Banda3, obtida a partir da imagem ETM do ano 2000.	237
7.8 - Distribuição georreferenciada dos transectos (T), observações fitofisionômicas e pontos observacionais (P), utilizados na amostragem.	239
7.9 – Histogramas da banda individual do vermelho em (a); e dispersograma da imagem multitemporal das duas bandas em (b) para as datas 1987 e 2000.	240
7.10 - Dispersograma da imagem multitemporal em Valle Fértil, na tela do programa de extração automática de parâmetros para cálculo do ângulo de rotação. Os números [n°] indicam sítios amostrais rotulados de não-mudança.	242
7.11 – Mapa de mudanças do período 1987 / 2000 de Valle Fértil.	244
7.12 – Obra viária para escoamento superficial das águas de chuva em área de fisionomia arbórea. Em (a) imagem composição 453; (b) mapa de mudanças; em (c) fotografia na qual se observa a obra viária correspondente ao ponto (po).	246
7.13 – Degradação por retirada de madeira, em fisionomia arbórea-arbustiva. Em (a) imagem composição 453; (b) mapa de mudanças; em (c) fotografia na qual se observa o toco da árvore confirmando tratar-se de área de degradação média (d1) e área protegida por cercado em (ro).	247
7.14 – Área cercada com padrão regular de uso em fisionomia arbóreo-arbustiva. Em (a) trecho da imagem em composição 453; (b) mapa de mudanças; (c) fotografia da área (re); linha de contraste produzida pela área cercada (ce).	249
7.15 – Recuperação e degradação forte em área agrícola. Em (a) trecho da imagem em composição 453; (b) mapa de mudanças com degradação forte (ro) e recuperação forte (cl); e (c) fotografia da área roçada (ro).	250

LISTA DE TABELAS

	pag.
1.1- Parâmetros para calibrar as imagens TM e ETM+.....	57
1.2 - Avaliação segundo o coeficiente K	80
1.3 - Qualidade das cartas segundo o Índice K	80
1.4 – Imagens digitais utilizadas.	98
1.5 – Imagem ETM 217 066 na data 10/09/2001, utilizada como base georreferenciada do sistema de detecção.....	99
2.1 - Documentação sobre as cenas.....	111
3.1- Parâmetros da análise por componentes principais para detecção de mudanças.....	123
4.1 - Escala de tamanhos dos sedimentos.....	147
4.2– auxiliar para análise de gabinete.....	151
4.3- Casos de rotulação segundo o intervalo de tempo entre imagem.	163
6.1 - Qualidade das cartas segundo o Índice K	204
6.2 – Matriz de confusão e índice K da diferença entre bandas nos anos 1984 e 2001.	206
6.3 – Matriz de confusão e índice K da diferença entre bandas nos anos 1996 e 2001.	207
6.4 - Matriz de confusão e índice K da diferença entre bandas nos anos 1999 e 2001.....	208
6.5 – Matriz de confusão e índice K da ACP entre bandas nos anos 1984 e 2001.....	209
6.6 – Matriz de confusão e índice K da ACP entre as datas 1996 / 2001.....	210
6.7 – Matriz de confusão e índice K da ACP entre as datas 1999 / 2001.....	211
6.8 – Matriz de confusão e índice K da RCEN entre as datas 1984 / 2001.....	213
6.9 – Matriz de confusão e índice K da RCEN entre as datas 1996 / 2001.....	214
6.10 – Matriz de confusão e índice K da RCEN entre as datas 1999 / 2001.....	215
6.11 – Matriz de confusão e índice K da RCIA entre as datas 1984 / 2001.....	216
6.12 – Análise comparativa para o intervalo 1984/2001 através do parâmetro estatístico Z	217
6.13 – Análise comparativa para o intervalo 1996/2001 através do estatístico Z	218
6.14 – Análise comparativa para o intervalo 1999/2001 através do estatístico Z	218
7.1 – Matriz de confusão e índice K	251

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO E MATERIAIS

1.1. Introdução

A desertificação é um processo particular de degradação de terras secas (áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas), que vem desencadeando crises sociais mundiais (fome, miséria, migração populacional). De acordo com Sobrinho (1986) e United Nations Environment Programme (UNEP) (1992), ainda não se obteve sucesso no combate efetivo deste processo. Esta falta de progresso no tema, segundo Dregne (1999), deve-se principalmente ao fato de que ainda não se dispõe de um sistema de monitoramento do processo de degradação das terras amplamente aceito.

Tentando solucionar este problema, variados sistemas utilizando sensoriamento remoto orbital estão atualmente sendo adaptados para uso operacional. Esta tecnologia já mostrou certa eficiência para identificação, estimativa e monitoramento da degradação de terras, porém não apresenta, ainda, uma consistência desejada pelos especialistas que estudam o semi-árido.

Tal consistência se refere, sobretudo à exatidão e constância da detecção dos processos de degradação. Estes processos, difíceis de identificação, podem estar atuando há longa data, sem serem percebidos pelos habitantes das áreas afetadas. Neste sentido, a hipótese que orientou este trabalho pode apresentar-se como: É possível, de uma forma consistente, detectar mudanças na cobertura vegetal do semi-árido, empregando metodologias e técnicas simples, no tratamento de imagens orbitais da faixa óptica?

Nesta hipótese, é considerada a palavra “consistente” sob dois aspectos: o da acurácia dos resultados, que se refere à constância dos resultados da detecção, apesar das condições instáveis da atmosfera que regem o semi-árido; e o aspecto da robustez da metodologia, que se refere à capacidade de manter os bons resultados, qualquer que seja o intervalo de tempo entre as imagens.

Por conseguinte, o **objetivo geral** da presente pesquisa foi desenvolver metodologias para detectar e cartografar a ocorrência de mudanças detectadas na cobertura vegetal em zonas do semi-árido brasileiro e argentino, procurando estabelecer um procedimento

metodológico capaz de registrar essas mudanças através dos indicadores fornecidos pelo sensoriamento remoto e subsidiados por informações de campo. Para atingir esse Objetivo Geral, os seguintes **objetivos específicos** foram propostos:

- Adequar técnicas de levantamento de campo para subsidiar a rotulação temática das mudanças e a geração de informações que possam interagir com aquelas oriundas das técnicas digitais de detecção.
- Desenvolver técnicas digitais de detecção de mudanças que minimizem a influência de fatores ambientais aditivos na resposta espectral dos alvos contidos na imagem.
- Desenvolver uma metodologia de detecção de mudanças capaz de articular dados e informações derivadas das técnicas de levantamento de campo e de processamento digital.
- Avaliar a metodologia desenvolvida numa área do semi-árido brasileiro, aplicando-a em outra área na região de Valle Fértil (Argentina), com diferente dinâmica no uso da terra.

1.1.1. Apresentação da Organização da Tese

A tese está organizada em capítulos auto-explicativos, cada qual contendo uma introdução, um desenvolvimento das técnicas empregadas e conclusões relativas a cada tema tratado. Esta organização foi motivada para agrupar no texto, um conjunto de conhecimentos necessários para o desenvolvimento de cada procedimento metodológico adotado. Neste Capítulo I ora apresentado, constam a fundamentação teórica, a descrição das áreas de estudo e os materiais empregados na pesquisa. No Capítulo II são apresentados os procedimentos para a montagem do banco de dados, com a incorporação dos materiais e outros planos de informação. No Capítulo III são tratados os conhecimentos de sensoriamento remoto e de computação gráfica que estão relacionadas ao uso propriamente dito das técnicas de detecção de mudanças (Diferença simples e Análise por componentes principais - ACP). O Capítulo IV trata da parte da biologia imprescindível para compreender as relações entre a vegetação e o ambiente, para formulação de um procedimento de aquisição e análise integrada dos dados de campo. No Capítulo V são apresentadas duas novas técnicas de detecção de mudanças

para a região semi-árida, baseadas em operações algébricas de imagens multitemporais da mesma banda espectral. No desenvolvimento dessas duas novas técnicas foi preparado um ambiente de computação científica, com a finalidade de integrar dados sensoriados e de campo. No Capítulo VI é apresentada a validação, por meio de ferramentas estatísticas, da acurácia dos mapas de mudanças geradas pelas várias técnicas empregadas, indicando aquela de melhor desempenho para o semi-árido brasileiro. A aplicabilidade desta técnica de melhor desempenho na região semi-árida argentina (Valle Fértil), com a descrição do método e dos resultados temáticos da detecção de mudanças, é apresentada no Capítulo VII. Finalizando, no Capítulo VIII são apresentadas as conclusões e recomendações finais, numa visão sinóptica de toda a abordagem utilizada no tratamento dos dados orbitais, integrados àqueles de campo, para o estudo indicativo das áreas de recuperação e degradação do semi-árido sul-americano.

1.2. Fundamentação Teórica

Neste Capítulo serão revisadas as bases teóricas mais importantes para a detecção de mudanças utilizando sensoriamento remoto orbital. A ênfase principal desta revisão foi feita para o uso do sensoriamento remoto passivo, ou seja, daqueles sistemas que obtêm os dados ambientais através de sensores que coletam a radiação solar refletida ou reemitida, observando os alvos através de suas propriedades ópticas (Schowengerdt, 1997).

Na primeira parte é apresentada uma análise das similaridades fisionômico-estruturais, climáticas e edáficas das áreas de interesse. Em segundo lugar as características espectrais da vegetação, influência dos solos e da sazonalidade. Em terceiro lugar são discutidos os indicadores para análise do processo de degradação da cobertura vegetal através de sensoriamento remoto e também, os indicadores de mudanças. Após a análise dos ambientes são apresentados os principais aspectos radiométricos das imagens ópticas orbitais, as técnicas de pré-processamento e as técnicas de detecção de mudanças para estudo da paisagem. Experiências do uso das imagens orbitais em estudos da cobertura vegetal e uso da terra no semi-árido, e finalmente as técnicas de amostragem do levantamento de campo, são também apresentadas. Adicionalmente, são

ainda revisados os principais aspectos ambientais que caracterizam a cobertura vegetal e o ambiente do semi-árido.

1.2.1. Análise das Similaridades Fisionômico-estruturais, Climáticas e Edáficas das Áreas de Interesse

As duas áreas de interesse estão situadas no interior das regiões semi-áridas do Brasil e da Argentina e estão inclusas na “Grande diagonal semi-árida sul-americana” segundo Cabrera (1994). Estas áreas apresentam similaridades sazonal e fito-fisionômicas, embora estejam localizadas em latitudes do hemisfério sul muito diferentes. A brasileira está situada aos 10° e a argentina aos 30° de latitude sul. O clima é o principal responsável pelas características fisionômicas destas áreas. A área brasileira apresenta homogeneidade térmica, em torno de 27 °C, mas com grande variabilidade interanual de chuvas, com valores de 600mm concentrados numa curta estação úmida de verão-outono e 7 a 8 meses de estação seca com precipitação escassa ou mesmo nula. Por sua vez, a área argentina possui invernos frios e secos e verões quentes e úmidos com a precipitação variando de 300 até 500mm. Apesar dessas diferenças climáticas, elas apresentam grande similaridade fisionômica, e nelas se desenvolve uma vegetação estépica arbustiva-arbórea baixa. As vegetações destas áreas foram agrupadas na Formação Vegetal do Bosque Subtropical Seco por Strassburger (1993). Rizzini (1976) observou que o chaco árido argentino e a caatinga brasileira são muito similares sazonalmente, tanto que utilizou dados da região de chaco para estimar as variações estacionais que acontecem na vegetação da caatinga. Na América do Sul, Hare (1975) agrupou estas áreas sob índices de aridez similares, cujo zoneamento pode ser observado na Figura 1.1, com o traçado das isolinhas de Índice de aridez.



FIGURA 1.1 - Isolinhas do índice de aridez calculadas a partir de dados meteorológicos interanuais.

FONTE: Hare (1975)

Os índices apresentados na 1.1 foram calculados como a razão entre a “média anual de irradiação” sobre a soma da “média anual de precipitação” e “calor latente de evaporação da água”. Assim, maiores índices significam maior aridez. Estas regiões indicadas apresentam forte irradiação solar. No semi-árido brasileiro, as temperaturas médias anuais estão ao redor de 25°C, com uma amplitude térmica menor que 5°C, típicas das zonas intertropicais (Reis, 1996). As menores temperaturas médias são de 22°C no mês de julho e as maiores, de 27°C no mês de janeiro. Na região argentina, há fortes diferenças de temperaturas anuais, alcançando valores de temperatura máxima superiores aos 38°C em dezembro-janeiro, enquanto que em julho a temperatura mínima pode atingir -7°C, com geadas inverniais (Minetti, 1988). Apesar dessas

diferenças climáticas, as similaridades fisionômicas da vegetação, podem ser entendidas através dos diagramas ombrotérmicos, apresentados na Figura 1.2.

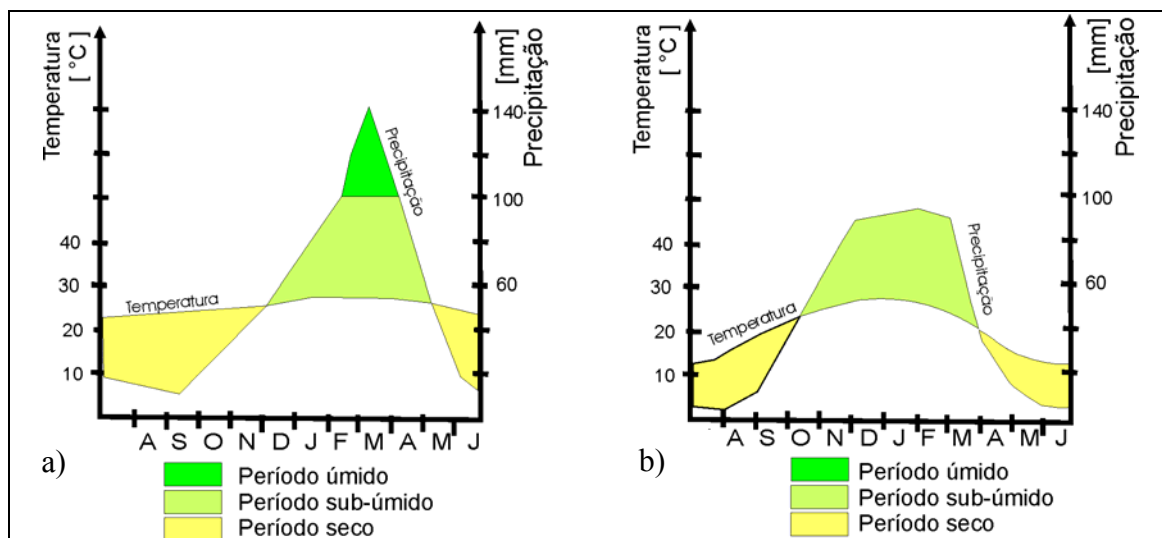


FIGURA 1.2. - Diagrama ombrotérmico representativo das regiões de interesse (a) semi-árido brasileiro e (b) semi-árido argentino.

Pode ser observado, na Figura 1.2, que na região semi-árida no período seco a evaporação é muito intensa. Neste tipo de gráficos (diagrama ombrotérmico) a evapotranspiração é representada pela área integrada entre as curvas de precipitação e temperatura, que no semi-árido brasileiro (FIGURA 1.2a) é muito grande. As folhas caem quando a seca aumenta e, de acordo com Walter (1986), mesmo durante a época chuvosa, quase todas as plantas já sofrem restrições de transpiração. Em razão destas condições, as zonas apresentam similaridade geo-botânica. Walter (1986) se refere ao “Chaco árido” como a parte mais ao sul-ocidental do “Ecótono Florestas semi-perenes” que inclui a Caatinga do Nordeste brasileiro. Este autor considera este ecótono como uma paisagem de difícil classificação, em razão da enorme variabilidade ambiental. Segundo Sarmiento (1975), isto pode ser notado através da ausência de um estrato arbóreo contínuo de qualquer altura; a ausência de um estrato gramíneo perene contínuo ou aproximadamente contínuo; a baixa altura da vegetação com as espécies mais altas entre 12 e 15 metros; as espécies lenhosas fisionomicamente dominantes, com formas arbóreas, arbustivas e suculentas; e a ocorrência permanente ou sazonal de

alta proporção de solo nu. As espécies arbóreas às vezes formam agrupamentos contínuos de pouca extensão, seguindo as condições edáficas e freáticas favoráveis. O estrato arbustivo é o único estrato lenhoso contínuo (Biurrun, 1998), e muitas espécies se protegem das condições secas apresentando formas pequenas, às vezes com folhas delicadas, reduzindo-as à espinhos, acumulando água, desenvolvendo raízes profundas, etc. As espécies que ocupam estas áreas apresentam grande heterogeneidade de formas. As áreas selecionadas são representativas de ambientes semi-áridos submetidos a processos de degradação. A atividade antrópica nestas regiões ocorre desde longa data. A ocupação da Caatinga e do Chaco ainda hoje está baseada principalmente na formação de pequenos vilarejos, em áreas favoráveis à atividade agropecuária, predominando a pecuária extensiva de bovinos e caprinos, associada às culturas de forrageiras, como palma, capim buffel, alfafa, e ainda uma agricultura de subsistência itinerante e de vazante (banhados na Argentina), com plantios de feijão, milho, abóbora e mandioca, (Martinez Carretero, 1987, Faria, 1992, Karlin et al., 1994 e Demaio et al. 2002). As modificações mais intensas na vegetação são, segundo Braun-Blanquet (1979), conseqüência da agricultura e refletem a ecologia do hábitat, qualidade do solo, necessidades de adubo, tipo de tratamento do solo ou super-exploração. Mais adiante são analisadas, separadamente, as características fisionômico-estruturais particulares dos semi-áridos brasileiro e argentino.

As características do solo da caatinga e do chaco está controlada pela condição climática e geomorfológica, como a quantidade e intensidade da chuva, radiação solar, temperatura, umidade e declividade do terreno bem como pelas comunidades de plantas que nele se desenvolvem. Segundo Faria (1992), o escoamento da água da chuva e a umidade do solo são os fatores limitantes para a produção agrícola no semi-árido brasileiro. As características climáticas, geológicas e geomorfológicas produzem solos silicosos ou silico-argilosos, enxutos, quase sem húmus, pedregosos ou arenosos, pobres em nitrogênio, porém com grau médio de fertilidade e teor de cálcio e potássio, como atesta a vegetação do algodoeiro e do caroá, segundo Negreiros Bessa (1982). Desta forma, os solos sertanejos são pouco desenvolvidos, e podem ser agrupados num complexo cujo tipo dominante é o dos luvisolos, que aparece nos níveis intermediários de relevos pouco ondulados. Estes solos estão associados aos neossolos regolíticos e

argissolos vermelho-amarelos eutróficos e outros do complexo latossolo, limitada a outro tipo de relevo.

Em parte da área brasileira, a superfície do solo encontra-se coberta por fragmentos litólicos. A origem destes fragmentos de quartzo na superfície do solo, ou “stone line” (Paton, 1978), é atribuída ao acúmulo durante a intemperização e o rebaixamento da superfície, diretamente a partir dos veios de quartzo do migmatito, segundo Guerra (1996). Os fragmentos se acumulam nos primeiros centímetros da camada do solo superficial, limitando a possibilidade de lavouras agrícolas, segundo Guerra (1996). Estes solos litólicos são característicos da geologia da caatinga (EMBRAPA, 1999).

Os processos de geodinâmica são semelhantes nos casos argentinos e brasileiros, sendo que as unidades de planícies ocupam grandes áreas abertas, as quais em geral, são ocupadas por grande heterogeneidade de tipos vegetais. Neste contexto, alguns pesquisadores, entre eles Vasconcelos Sobrinho (1986), propõem que os estudos sub-regionais da vegetação semi-árida empreguem uma abordagem metodológica que inclua o sensoriamento remoto. Esta ferramenta seria importante para subsidiar a caracterização e a localização geográfica da degradação, bem como a magnitude e a direção do processo expansionista da ação antropogênica para as áreas vizinhas. A seguir, apresenta-se uma revisão das características importantes da vegetação para os estudos com sensoriamento remoto óptico.

1.2.2. Características Espectrais da Vegetação da Região Semi-árida

Um dos objetivos do sensoriamento remoto é identificar as características do terreno, obtidas através do fluxo radiante que é refletido em diferentes comprimentos de onda (Slater, 1980). Esta radiação proveniente do sol, ao incidir sobre um alvo, interage com a superfície do material constituinte deste, podendo ser refletida, absorvida ou transmitida. O comportamento espectral da vegetação (FIGURA 1.3), deve ser analisado em duas porções do espectro eletromagnético, uma do visível onde predomina a reflexão e absorção e outra, infravermelho, onde os fenômenos de interação da radiação com a vegetação são muito complexos.

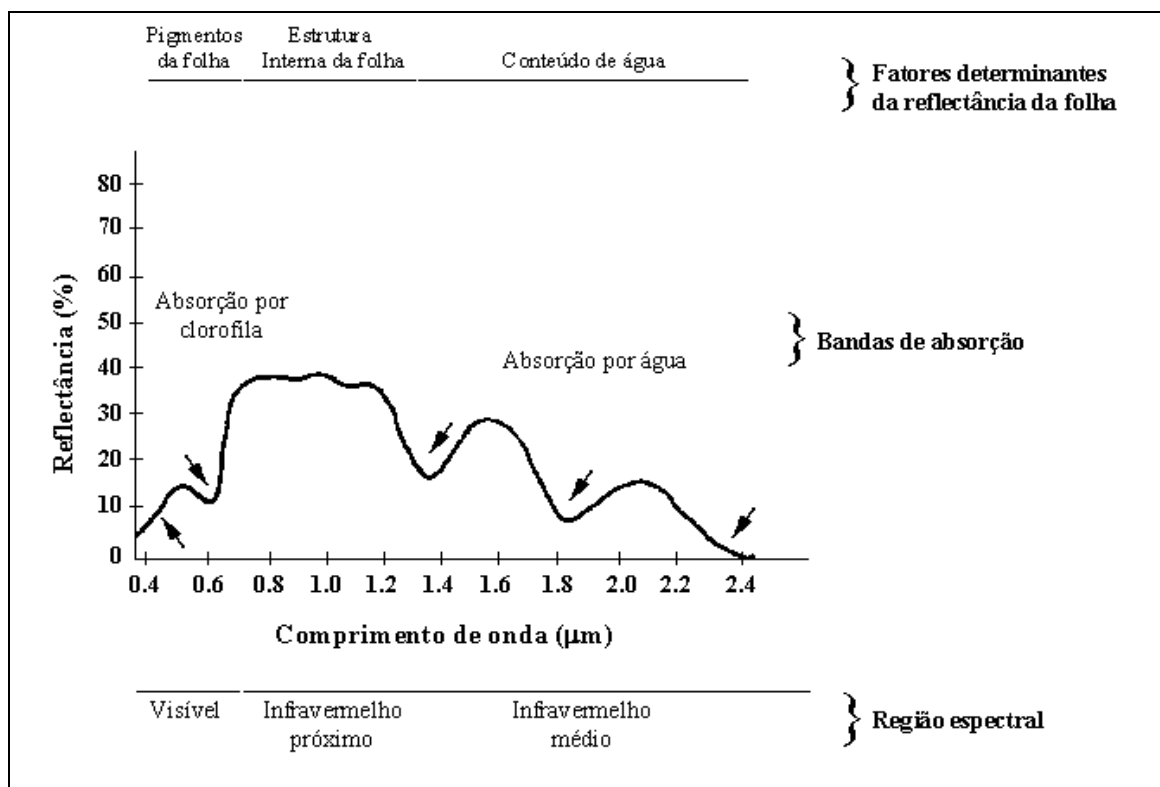


FIGURA 1.3 - Comportamento espectral característico da folha verde.

FONTE: Adaptada de Campbell (1996).

Na primeira porção região do visível, entre 0,4 até 0,7μm (FIGURA 1.3), os parâmetros que dominam os valores de refletância são os pigmentos, com a maior parte da energia sendo absorvida e pouco transmitida. Na segunda porção, no intervalo de 0,7 a 1,3μm, denominado infravermelho próximo, predominam as características da estrutura celular da folha; e na terceira porção, entre 1,3 a 2,5μm, os valores de reflectância são determinados pelo conteúdo de água na vegetação (Campbell, 1996). Variações de reflectância na região do visível estão associadas, segundo Kumar (1972), à concentração de clorofila e de outros pigmentos em diferentes estágios de desenvolvimento da folha. A elevada reflectância das folhas na faixa do infravermelho próximo deve-se a sua estrutura celular interna, com descontinuidades entre as células (Gausmam, 1985). Esta resposta das folhas depende do estado das células (turgência) o que depende estreitamente da umidade ambiente e da estratégia desenvolvidas pela vegetação para enfrentar o déficit hídrico. A vegetação do semi-árido, em geral, possui

variadas adaptações para prosperar neste ambiente, destacando-se a caducifolia e as profundas modificações estruturais. Asner et al. (2000) observaram que a componente da resposta espectral do ambiente produzida pela vegetação no infravermelho não é consistente para caracterizar este tipo de ambiente.

Porém, na região espectral do vermelho, este mesmo autor estima factível utilizar a resposta espectral da vegetação para caracterizar o ambiente do semi-árido. Neste a caracterização deve ser sempre tratada a partir do ponto de vista da complexa mistura espectral vegetação/solo/sombra. Esta situação de mistura aumenta em relação a diminuição da resoluções espaciais das imagens utilizadas para o estudo. Os elementos desta mistura espectral são o solo que pode estar iluminado ou não, a vegetação que em alguns casos possui alta cobertura de copa e as sombras que a própria vegetação produz sobre o solo ou sobre elementos subjacentes. Os solos claros são os mais frequentes no semi-árido, isto torna compreensível sua importância espectral. A seguir será vista o comportamento espectral do solo e sua participação sobre a resposta espectral do ambiente.

1.2.2.1. Influência dos Solos no Comportamento Espectral do Ambiente

A influência dos solos no comportamento espectral da vegetação deve ser analisada separadamente, quer em áreas de baixas coberturas vegetais (<30%), como em altas coberturas vegetais (>30%), conforme recomendam Tueller (1987) e Pinker e Karnieli (1995). Estes autores determinaram que o solo constitui-se como a principal componente da resposta espectral quando a cobertura vegetal no semi-árido está próxima ou menor do que 30%. Concordando com isto, Hutchinson (1982), Prince (1987) e Milton et al. (1990), observaram que, quando a cobertura vegetal do semi-árido é menor que 30%, o sensor do satélite não pode extrair com facilidade a resposta da vegetação. Estas observações estão relacionadas com a alta resposta espectral dos solos imaturos do semi-árido, caracterizadas pelos baixos teores de matéria orgânica e de umidade.

A refletância diminui quando o teor da matéria orgânica aumenta. Estudos realizados por Baumgardner et al. (1970) mostram que, quando o teor de matéria orgânica excede 2 %, é importante sua consideração na região refletiva do espectro eletromagnético. Estes altos valores de teor de matéria orgânica são extremamente raros no semi-árido (Duque, 1980), em consequência das altas temperaturas que alcançam o solo. Neste caso, a textura e a granulometria da sua superfície tornam-se os fatores mais importantes para explicar as características da sua resposta espectral. A refletância diminui quando a umidade e a matéria orgânica aumentam, a relação ambiental entre a umidade e matéria orgânica está estreitamente relacionada com a exposição do solo ao intemperismo, e produz os solos claros típicos do ambiente semi-árido.

A textura e a granulometria da superfície estão relacionadas com os materiais que formaram o solo. A textura com a mistura de elementos físico-químicos que produzem um padrão superficial de cor do solo. A textura e a granulometria (tamanho das partículas), quando referidos em conjunto, caracterizam a superfície do solo apropriadamente para as técnicas do sensoriamento remoto. Stoner e Baumgardner (1980) observaram que solos de textura arenosa (partículas milimétricas com alta proporção de quartzos) aumentam a refletância, na medida que proporções de areia fina e muito fina tornam-se maiores. A situação é oposta para solos não arenosos (orgânicos,

siltosos ou argilosos) de textura média e fina, pois há uma formação de agregados estáveis em água, ocasionando a criação de uma superfície diferente daquela formada por grãos simples de solos arenosos, diminuindo a reflectância. Estes sofrem intemperismo, são transportados e depositados. Associados a estes processos ocorrem mudanças na superfície dos solos associadas às mudanças na cobertura vegetal. Algumas destas mudanças são detectadas pelo sensor e respondem às novas condições físicas da superfície, quando a cobertura vegetal é aberta.

Na Figura 1.4, a seguir é apresentada a resposta espectral dos solos, conjuntamente com outros elementos que podem compor as respostas espectrais do complexo vegetação/solo.

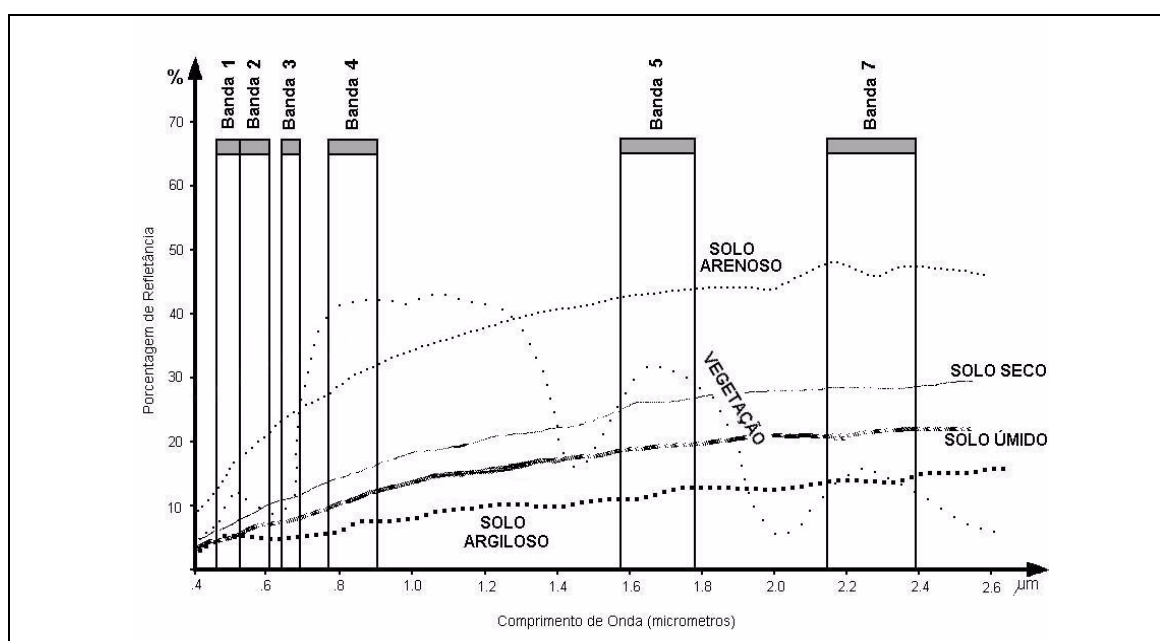


FIGURA 1.4 - Resposta espectral característica da vegetação verde, solo arenoso e argiloso em condições úmida e seca, sobrepostas bandas Landsat TM.

FONTE: Adaptação de Myers (1983) e Valério Filho e Pinto (1996).

Como pode ser observada na Figura 1.4, a banda do vermelho (TM3) possui sensibilidade similar para as diferentes feições do ambiente, como as apresentadas pelos tipos de solo e de vegetação. Isto permite que seja potencialmente útil para a detecção de mudanças na cobertura vegetal do semi-árido, quando o ambiente é analisado para entender seu comportamento radiométrico através das mudanças. Assim, a detecção de

mudanças deve fazer ênfase na detecção de propriedades como o aparecimento de novos elementos ambientais (como as clareiras), que caracterizam determinadas mudanças. A faixa espectral deve portanto ser igualmente sensível a estes elementos emergentes. Apenas exemplificando a importância deste conceito, a banda espectral deve ser sensível à perda ou aumento dos componentes solo e sombra, como indicado em Asner et al.(1998).

1.2.2.2. Influência da Sazonalidade no Comportamento Espectral da Vegetação da Região Semi-árida

A vegetação do semi-árido apresenta marcada sazonalidade e épocas intermediárias onde há muitas espécies vegetais ainda sem folhagem. Estas últimas são produzidas em parte pelo comportamento vegetativo regular de muitas espécies que apresentam relativa independência dos eventos climáticos, o que é conhecido como estabilidade fenotípica. Essas espécies estáveis caracterizam a resposta sazonal da vegetação e não respondem às primeiras chuvas, permanecendo com baixa atividade de crescimento, seguindo inclusive outros indicadores, como o foto-período. Outras espécies, contudo, cujo ciclo vegetativo acompanha a irregularidade climática, aproveitam rapidamente o aumento da umidade. Esta última estratégia caracteriza o comportamento das espécies pioneiras na reconquista de terrenos modificados. Porém esta estratégia pode ser prejudicial, para esta espécie, quando as condições de irregularidade são extremas. Esta característica da dinâmica da cobertura vegetal pode ser observada em algumas espécies da caatinga. Entre as últimas encontramos o Marmeleiro (*Cróton sonderianus*). Esta espécie arbustiva forma comunidades densas com alta dominância e, quando as condições de aridez são extremas, a mortalidade em geral é alta. Isto permite, na maioria dos casos, a substituição de espécies na ocupação (sucessão). Esta heterogeneidade de respostas sazonais caracteriza o semi-árido e dificulta o seu estudo espectral.

Porém é importante considerar algumas particularidades da resposta espectral da vegetação da caatinga na época da seca. A baixa atividade fotossintética refletida pelo aspecto seco dos estratos que compõem as fácies de caatinga faz com que a resposta espectral desta formação tenha um importante componente de sombreamento da porção lenhosa (troncos e galhos). A ausência de material foliar verde em grande número de

espécies, diminui a influência da componente folha na resposta espectral segundo Fueller et al. (1997) e Asner et al. (2000), aumentando ainda mais a importância do sombreamento sobre o solo, pela presença da serrapilheira e da vegetação dos estratos inferiores. O efeito do sombreamento por alta densidade de galhos produz uma diminuição da refletância dos elementos subjacentes dos estratos inferiores. As características da vegetação natural da caatinga contrastam com as das culturas implantadas que possuem alta atividade vegetativa (atividade fotossintética) e a dominância de poucas espécies, segundo Choudhury (1992). As primeiras, segundo Moore e Chapman (1990), apresentam-se com características xerófilas e as segundas, mesófilas.

Frente a este panorama ambiental complexo devemos usar bandas espectrais sensíveis na mesma proporção aos dois tipos de vegetação presentes na cena. Para a aquisição de conhecimentos sobre um fenômeno multidimensional, qualquer que seja, a ferramenta para estudá-lo deve ser sensível na mesma proporção a todas suas dimensões e pouco sensível a outras dimensões sem interesse. Assim, uma seleção espectral apropriada deve incluir bandas sensíveis tanto aos solos como à cobertura vegetal xerófila e mesófila e, principalmente às sombras. Esta última dimensão, como já foi observado anteriormente, caracteriza as mudanças. Frequentemente na dinâmica ambiental este é um elemento emergente de extrema importância diagnóstica para a detecção de mudanças na cobertura vegetal.

Em Maldonado (1999), foram analisadas, sob o ponto de vista espectral, imagens ópticas da caatinga na época seca, observando que a região espectral do vermelho e do infravermelho estão correlacionadas. Alguns autores, como Huete e Jackson (1985) e Huete (1988), expressam que, numa análise genérica de áreas vegetadas, as bandas do vermelho e infravermelho próximo são inversamente correlacionadas. Levando em consideração as duas observações acima mencionadas, para a região do semi-árido deve ser investigado separadamente o comportamento espectral da vegetação em períodos sazonais distintos, como mostrado na Figura 1.5.

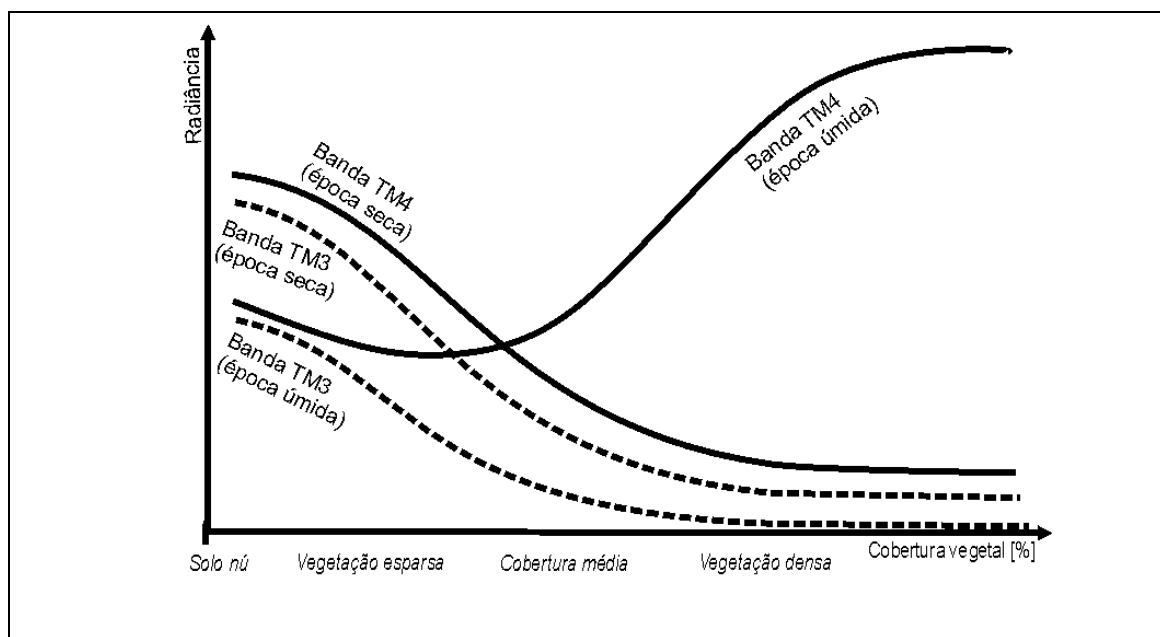


FIGURA 1.5- Estimativa do comportamento das bandas TM3 e banda TM4 na época seca e época úmida.

FONTE: Adaptado de Maldonado (1999).

Observa-se na Figura 1.5 que na época seca a caatinga se comporta radiometricamente de forma similar tanto na banda do infravermelho próximo (TM4) quanto na banda do vermelho (TM3). Porém de forma inversa à banda do infravermelho próximo (TM4) na época úmida, como visto na Figura 1.5. Este comportamento radiométrico já foi observado na caatinga por Kazmierczac (1993), em relação ao NDVI (diferença normalizada entre banda TM3 e TM4). Este autor estudou o comportamento da banda TM3 em relação à banda TM4 e observou que a banda TM4 responde rapidamente ao começo da época úmida, atingindo valores quase tão altos como os da floresta úmida e, radiometricamente, de forma inversa à banda TM3. Toda essa conceituação é reforçada pelo registro de que a cobertura vegetal da região semi-árida forma um mosaico na época seca e na época úmida este mosaico desaparece pela saturação das bandas do infravermelho causada pelo vigor da vegetação. Apoiando estas observações, Asner et al. (2000) construiu um gráfico (FIGURA 1.6) que serve para embasar a preferência adotada nesta tese, pelo uso da banda do vermelho, para o estudo da vegetação do semi-árido.

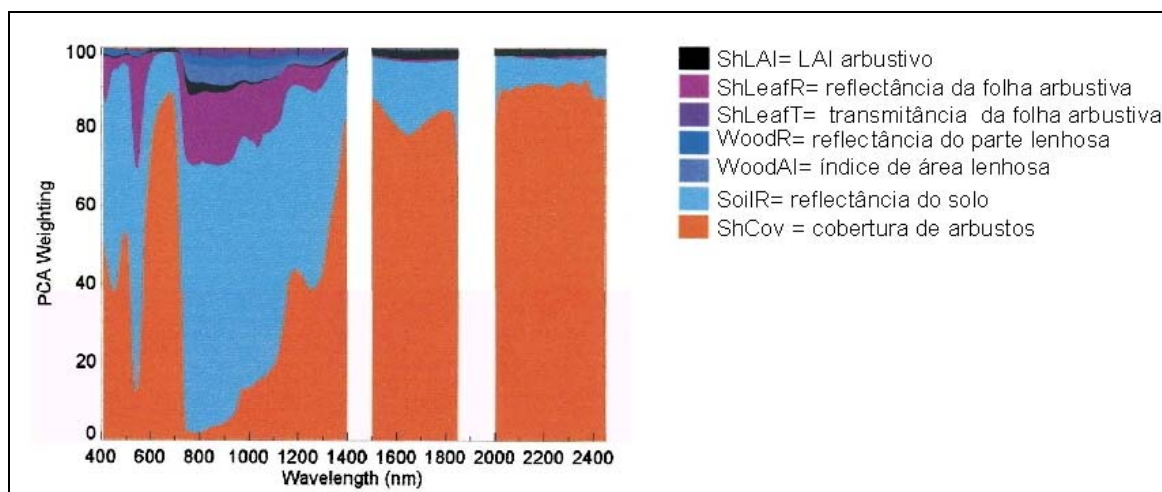


FIGURA 1.6 - Gráfico de participação de cada elemento da paisagem na resposta radiométrica do sítio, segundo o comprimento de onda.

FONTE: Asner et al. (2000)

Na Figura 1.6 observa-se claramente a diferença entre a faixa espectral de vermelho 0,6-0,7 μ m com a do infravermelho 0,7-0,8 μ m. No vermelho (TM3) a resposta radiométrica possui somente duas componentes, a de maior participação na resposta total de um sítio é a cobertura de arbustos (cor laranja), e a participação da reflectância do solo é muito menos importante. Porém, no infravermelho próximo (TM4), a resposta depende minimamente da cobertura de arbustos e depende na maior proporção da reflectância do solo. Nesta faixa espectral, a reflectância das folhas e da parte lenhosa são importantes componentes, embora em muito menores proporção que o solo (Ray e Murray, 1996).

1.2.2.3. Indicadores para Análise do Processo de Degradação da Cobertura Vegetal através de Sensoriamento Remoto, com Ênfase no Semi-árido.

O sucesso das técnicas de detecção e monitoramento da degradação de terras, depende basicamente da definição de indicadores sensíveis a estes processos (Dregne, 1998). Um indicador adequado deve ser capaz de prover estimativas contínuas sobre as perturbações do ambiente e de diferenciar ciclos. Este também deve ser relevante ao processo de degradação estudado e, segundo Art (1998), deveria poder caracterizar o

esgotamento ou destruição dos recursos naturais potencialmente renováveis como; solo, pastagem, árvores ou vida selvagem.

Neste sentido a estrutura da vegetação funciona como indicador de estado do ambiente e suas variações são indicadores da dinâmica ambiental. A estrutura da vegetação é particularmente sensível às mudanças de fertilidade, cuja diminuição é característica dos processos de degradação. Ela também reflete radiometricamente a presença de processos de degradação e recuperação. Porém, para utilizá-la como indicador deve-se definir as características que diferenciam ambientes degradados daqueles não degradados, e reconhecer a natureza das perturbações que ocasionaram a degradação, ou que podem provocá-la.

Em relação aos termos degradação e recuperação, usados na presente monografia, o primeiro foi utilizado por Drumond et al. (1979), para se referir ao processo em áreas que têm perdido elementos de valor para a economia madeireira. Este valor também é relativo ao uso agropecuário das terras. O termo recuperação foi usado por Vasconcelos Sobrinho (1986), entre outros, ao incluir na metodologia de estudo da desertificação, considerações acerca das possibilidades de regeneração, espontânea ou induzida, das áreas.

Estes indicadores devem ser quantitativos, sensíveis a pequenas mudanças, facilmente mensuráveis e relativamente sem ambigüidades. Existem vários tipos de indicadores úteis para o monitoramento dos processos de degradação de terras. Estes podem ser: fitossociológicos, hidrológicos, geomorfológicos, climáticos e até sociais. Contudo, a principal dificuldade é encontrar indicadores mensuráveis com técnicas de sensoriamento remoto. Estes indicadores, para serem efetivamente úteis na análise do processo de degradação, devem ser mensuráveis através das técnicas de sensoriamento remoto orbital. Para estas técnicas, o comportamento de indicadores adequados, deve expressar-se através do fluxo radiante, que é refletido em diferentes comprimentos de onda.

Uma maior resolução espacial das imagens facilita a detecção de mudanças na estrutura da vegetação. Mas, a aquisição de imagens de alta resolução aumenta grandemente o custo financeiro dos estudos. Isto limita as aplicações no semi-árido, porque em geral a baixa produtividade das terras limita o financiamento de tecnologias onerosas. Portanto,

como já foi mencionada, a resolução espacial média é considerada mais apropriada neste trabalho.

O uso desta resolução espacial média significa que a escala é a principal limitação para a seleção de indicadores. Segundo Woodcock e (1987), a escala está relacionada com a variância da cena; a diminuição da escala diminui a variância, o que significa basicamente uma perda de informação. Por esta razão, alguns indicadores em escala global são qualitativos, e em escalas maiores, como as regionais, podem ser quantitativos. O albedo e os índices de vegetação na escala global são qualitativos, mas em escalas maiores como a regional, podem se tornar quantitativos. Na escala setorial, os índices de vegetação são quantitativos e mensuráveis através dos padrões e da estrutura da vegetação. Em escala maior, como a local, os índices de vegetação podem ser quantitativos e úteis para análise de muitos parâmetros biofísicos.

No semi-árido, a erosão hídrica e eólica são, geralmente, irreversíveis porque a velocidade do desenvolvimento do solo sempre é menor que a da erosão (Dregne, 1998 e Egler, 2001). De acordo com este último autor, este processo de degradação começa com a diminuição da cobertura vegetal do solo, o que geralmente é refletido pela estrutura da vegetação; continua através do aumento do escoamento da água da chuva, da erosão hídrica e perda de solo, o que diminui ainda mais a cobertura vegetal. E termina, com a perda dos remanescentes de solo e da fertilidade. Existem vários índices de erosão capazes de medir esta degradação. Estes, no geral, tematicamente fornecem bons resultados embora apresentem limitações para a quantificação espacial dos processos, segundo Pickup et al. (1998), Hill et al. (1996) e Dwivedi et al. (1997).

Há extensa bibliografia sobre estudos da cobertura vegetal do semi-árido utilizando técnicas de sensoriamento remoto. A maior parte dos autores reconhece as dificuldades que o semi-árido apresenta para o uso das técnicas clássicas de estudo da vegetação. Asner et al. (2000) considera que a principal dificuldade para se obter sucesso, é a variabilidade da radiometria de bandas no infravermelho. Também, na escala de paisagem, as técnicas devem estar baseadas em critérios de padrão, textura, tonalidade, forma, tamanho, vizinhança e contexto das imagens.

1.2.2.3.1. Indicadores Espectrais da Vegetação

O uso da vegetação como indicador espectral de mudanças ambientais está relacionado com a estrutura vertical e horizontal e com a forma de vida e hábito de crescimento dos principais componentes da vegetação, segundo Zonneveld (1988) e Milton et al. (1990a). Segundo o primeiro autor, a cobertura vegetal deve ser estudada considerando os modelos de mistura espectral, e aponta a sombra das formas arbóreas como altamente expressivas do tipo de ambientes vegetados. Porém esta abordagem é pouco quantitativa e para obter indicadores radiométricos confiáveis, o comportamento espectral da vegetação deve ser analisado separadamente em duas porções do espectro eletromagnético, no visível cuja atividade é absorptiva da radiação e no infravermelho, onde a vegetação é fortemente refletiva quando coberta de folha e levemente absorptiva quando não possui folha ou se trata de vegetação xerófila.

As variações de refletância na região do visível estão associadas à concentração de clorofila e de outros pigmentos em diferentes estágios de desenvolvimento da folha (Kumar, 1972). Na época seca, no semi-árido, a baixa atividade fotossintética e o aspecto seco da fisionomia da caatinga fazem com que a resposta espectral desta formação tenha um importante componente do sombreamento da porção lenhosa (troncos e galhos). A influência na resposta espectral da componente folha é menor no árido e semi-árido, do que em outros ambientes. Isto se dá em função da ausência de material foliar verde em grande número de espécies, o que aumenta a importância do sombreamento da vegetação sobre o solo, serrapilheira e vegetação dos estratos inferiores. Em grande número de espécies, a alta densidade de galhos produz uma diminuição da refletância dos elementos subjacentes dos estratos inferiores, seja solo ou serrapilheira.

Asner et al. (2000) observou que a variabilidade espectral, no infravermelho próximo e médio é muito alta e não está associada com nenhuma característica importante da paisagem do semi-árido. No infravermelho próximo, predominam as características da estrutura celular da folha; e na porção do infravermelho médio, entre 1.3 a 2.5 μ m, os valores de reflectância são determinados pelo conteúdo de água da vegetação, segundo Gausman (1985). Estas características na vegetação do semi-árido são muito variáveis,

portanto pouco confiáveis. Neste sentido, Chavez e MacKinnon (1994) não aconselham o uso do infravermelho próximo como indicador de mudanças em regimes de semi-árido, por não ser significativa a diferença entre a reflectância dos solos e da vegetação, sugerindo a região espectral do vermelho como mais consistente.

Assim, alguns autores deram maior importância à época seca e às faixas do visível para a discriminação da vegetação semi-árida, como Carvalho (1986) e Sá (1991), em razão de serem melhor observadas as características mais relevantes da vegetação, quando esta encontra-se pouco coberta pela folhagem. Também, Robinove et al. (1981), Tripathy e Gosh (1996) e Accioly et al. (2001) encontraram satisfatórios os resultados do uso do albedo como indicador de degradação. Mais especificamente, Babayev (1991), Changyao (1993) e Maldonado, et al. (2002), obtiveram bons resultados com o uso da faixa espectral do vermelho. Asner et al. (2000) sugere, para estudar o semi-árido, as faixas do visível, fazendo registrar o uso de radiômetros de baixo custo nos trabalhos de supervisão de campo. Além de permitir relacionar visualmente as cores observadas a olho nú com os dados das imagens, como destacou Escadafal et al. (1989). A seguir, alguns aspectos do comportamento multiespectral serão revisados.

1.2.2.3.2. Indicadores Específicos do Comportamento Radiométrico Multiespectral

O comportamento radiométrico multiespectral quando relacionado com a arquitetura do dossel caracteriza melhor as variações na estrutura da vegetação. Ele é quantitativo e sensível às pequenas mudanças, facilmente mensurável e relativamente sem ambigüidades, capaz de prover estimativas contínuas das perturbações sobre o ambiente e de diferenciar ciclos. O principal indicador com estas características é o Índice de Vegetação Normalizado - NDVI, muito utilizado atualmente. Cohen (1991) confirmou excelente resposta do NDVI às mudanças de plantas do semi-árido no laboratório, mas no ambiente natural, encontrou grandes dificuldades para utilizar o índice num gradiente de cobertura vegetal. Segundo Asner et al. (2000), isto ocorre em razão da variabilidade da reflectância do infravermelho que apresenta o ambiente do semi-árido. No semi-árido de Israel, Shoshany et al. (1994) encontraram consistência quando compararam os resultados obtidos com Landsat TM na época seca, com os mapas do semi-árido, num gradiente desde floresta até arbustal aberto. Kazmierczak (1993), ao estudar o NDVI na

vegetação da caatinga encontrou dificuldades no seu uso em épocas intermediárias, e por alcançar na época úmida, valores altos até a saturação do índice e conseqüentemente, uma homogeneização das imagens em termos espectrais.

Outro indicador muito utilizado é o Índice de Brilho do solo. Alguns autores encontram que este indicador é confiável para detecção das mudanças do solo em áreas de baixa cobertura vegetal. Por sua vez, Escadafal (1996) e Pickup e Chewings (1996) propõem um índice de erosão de solo e um índice de estabilidade para o monitoramento e acompanhamento da erosão a que está submetida a superfície do solo. Estes índices estão baseados nas mudanças de brilho, em resposta às mudanças de granulometria e microrelevo da superfície. Neste sentido, Escadafal (1996) propõe a determinação periódica da condição da superfície do solo, como um indicador para o monitoramento dos processos de degradação de terras.

Um indicador experimental é a distância ao eixo de não mudança do diagrama de espalhamento da imagem detecção conforme apresentado por Maldonado et al. (2001b). O eixo de não mudança pode ser analisado com uma regressão entre pixels de não mudança entre datas. Este indicador radiométrico minimiza os efeitos da variabilidade de transparência da atmosfera por umidade ou poeira, a irregularidade sazonal, as diferenças nos sensores e no ângulo de elevação solar na data do imageamento. Embora estes efeitos continuem produzindo parte da variabilidade radiométrica das imagens, encontram-se relativamente minimizados. A seguir, serão revisadas as características do comportamento radiométrico das imagens orbitais, que serão, nesta tese, as principais ferramentas de estudo das mudanças do ambiente semi-árido.

1.2.3. Indicadores de Mudanças

Estes indicadores estão relacionados com o ambiente e podem ser observados entre os elementos da vegetação, fauna, superfície do solo, testemunhas de atividade antrópica, etc. A seguir, na Figura 1.7 apresentam-se variadas combinações dos tipos de indicadores observados no terreno e das mudanças radiométricas quantificadas nas imagens, com intervalos de tempo não menores que dez anos.

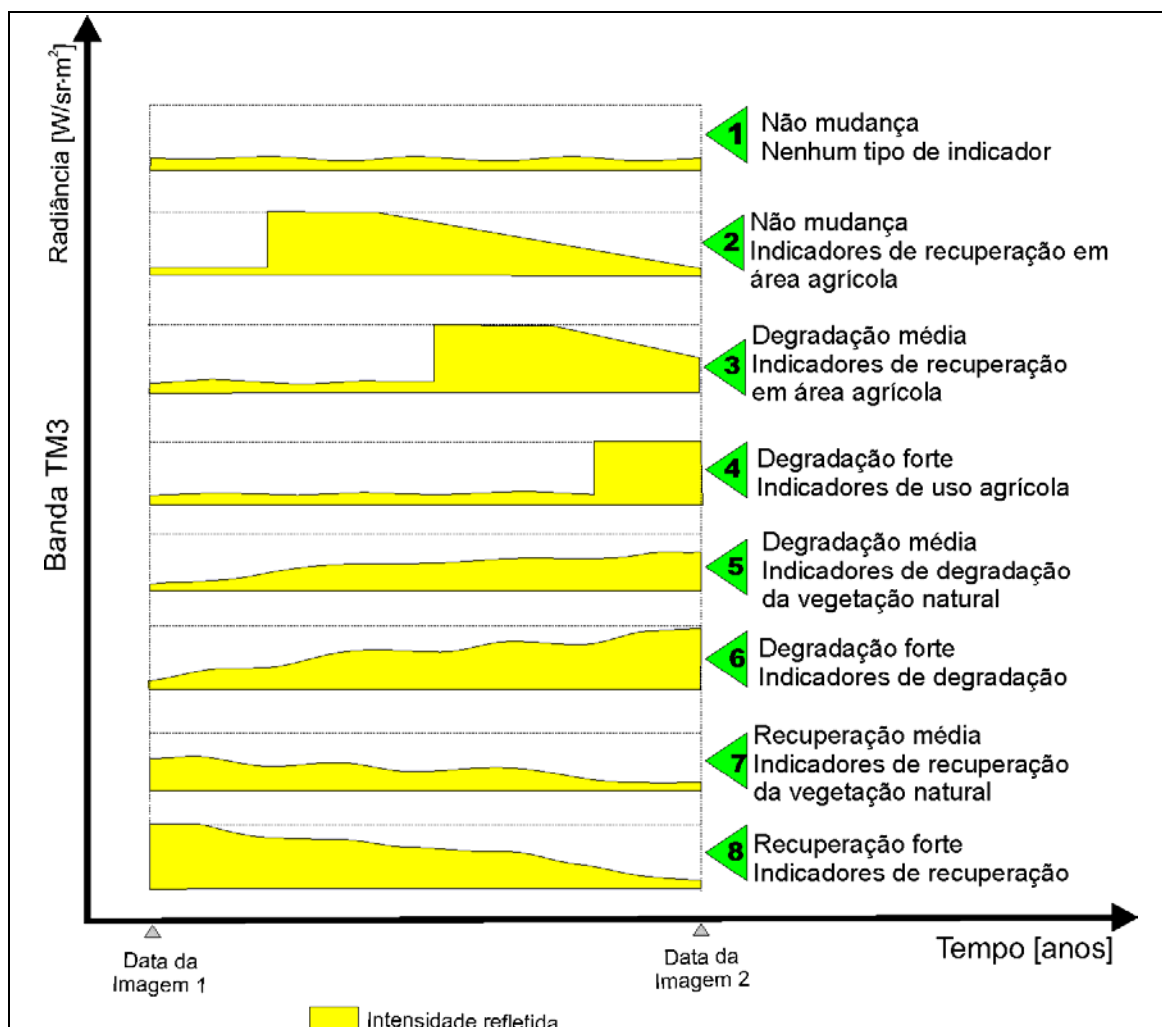


FIGURA 1.7 - Diagrama das mudanças radiométricas na faixa visível para áreas arbóreo-arbustivas submetidas às transformações de uso e cobertura das terras (roçados, pastoreio, corte, etc).

Os casos vistos no diagrama anterior (FIGURA 1.7) foram simplesmente representados através das mudanças radiométricas da faixa espectral do vermelho. Apresentam-se oito casos simples de mudanças radiométricas em áreas de caatinga arbóreo-arbustiva, com intervalo de tempo entre imagens da ordem de dez anos. Destes, dois casos são de não-mudança, dois de degradação por corte raso, dois de degradação por uso extensivo e dois casos de recuperação, descritos a seguir, caso a caso.

O **Caso 1** é típico de não mudança em áreas vegetadas, caracterizando-se pela falta de indicadores de mudança de qualquer tipo. Radiométricamente os valores baixos,

característicos de áreas vegetadas, são mantidos ao longo do período estudado. O **Caso 2** também é um caso de não mudança. Embora tenha ocorrido corte raso no sítio amostral, o intervalo muito longo de aplicação da técnica de detecção não o permite detectar. Este caso não pode ser detectado radiometricamente, nem rotulado pelos dados de campo como recuperação, embora, no sítio se observem muitos indicadores de recuperação, especialmente a ocorrência de algumas espécies arbóreas no sub-estrato arbustivo superior e de um estrato arbóreo baixo. Este caso geralmente não ocorre quando o intervalo entre imagens é menor do que 8 anos, senão as mudanças radiométricas seriam detectadas. O **Caso 3** é um caso de degradação por corte raso em que o sítio foi ocupado por culturas perenes como palma ou foi abandonado à ocupação de espécies da caatinga. O **Caso 4**, degradação por roçado em uso, apresentando na época seca uma alta porcentagem de solo nu. Os **Casos 5 e 6** acontecem quando a degradação não foi causada por corte raso mas geralmente, por corte seletivo ou coleta de madeira. Este caso, no semi-árido, não é detectável em imagens com intervalos menores do que 4 anos, já que a recuperação média desta cobertura é em geral muito lenta para ser detectada radiometricamente neste prazo. Os **Casos 7 e 8** são casos de recuperação cuja magnitude depende somente da velocidade de recuperação da caatinga. Em geral, em imagens muito próximas, a recuperação detectável é proveniente do corte raso. Na Figura 1.8 são apresentadas as variações radiométricas da faixa espectral do vermelho associadas às variações na cobertura vegetal. Esta radiometria é um indicador quantitativo facilmente mensurável e relativamente sem ambigüidades. A seguir são apresentados, numa visão florística, os Ciclos de degradação/recuperação ambiental de áreas de caatinga arbóreo-arbustiva, mostrando com as espécies características dos estágios destes ciclos, segundo Sá et al. (1994). Na Figura 1.8 mostram-se os ciclos em neossolos, frequentes no centro-sul da área de Ouricuri (PE).

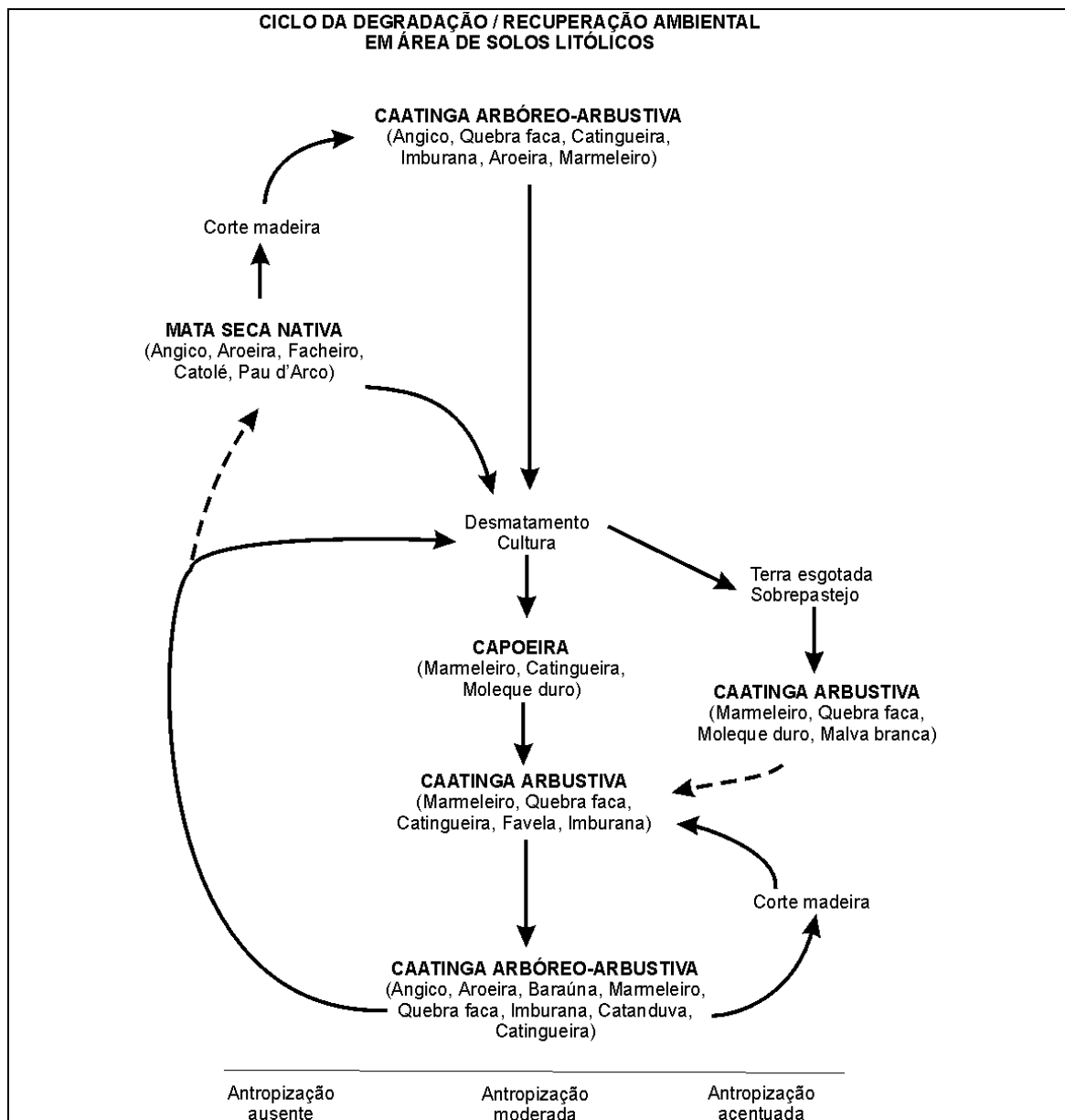


FIGURA 1.8 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de neossolos.

FONTE: Sá et al. (1994).

Pode-se observar, na Figura 1.8, os elementos arbustivos que caracterizam a recuperação como o Marmeleiro (*Croton sonderianus*), que neste ambiente do semi-árido em neossolos litólicos também formam parte das comunidades vegetais maduras. Por este motivo as observações de abundância/dominância desta espécie caracterizam o estágio dentro do ciclo. Na Figura 1.9 apresenta-se este ciclo de mudança para luvissolos, comuns no leste da área.

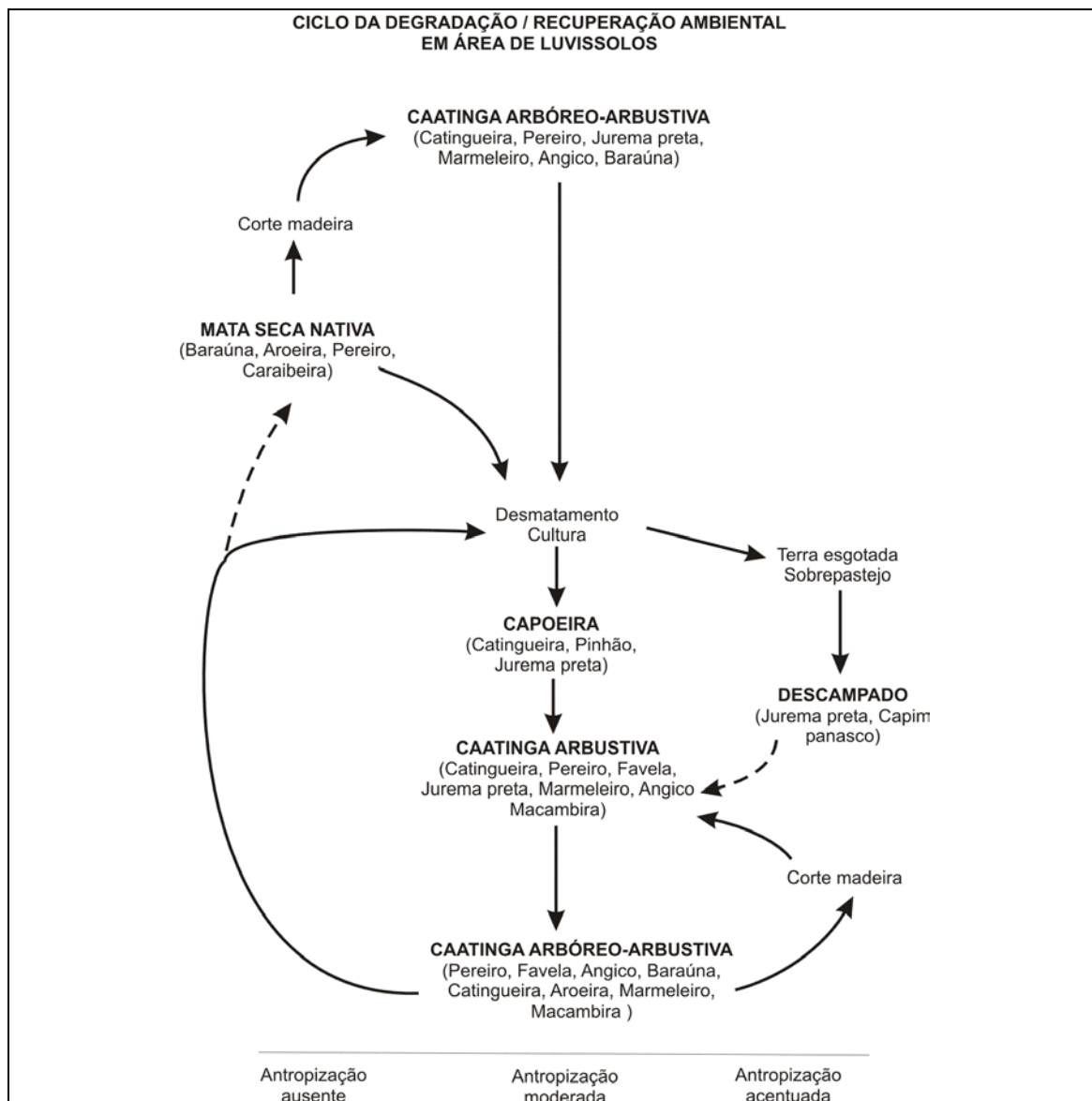


FIGURA 1.9 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de luvissoles.

FONTE: Sá et al. (1994).

Neste ambiente, a Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*) e a Jurema preta (*Mimosa hostilis*) são as espécies características da reconquista vegetal, como mostrado na Figura 1.9. A seguir na Figura 1.10, é apresentado o ciclo para os planossolos, comuns no centro e centro-norte da área de Ouricuri.

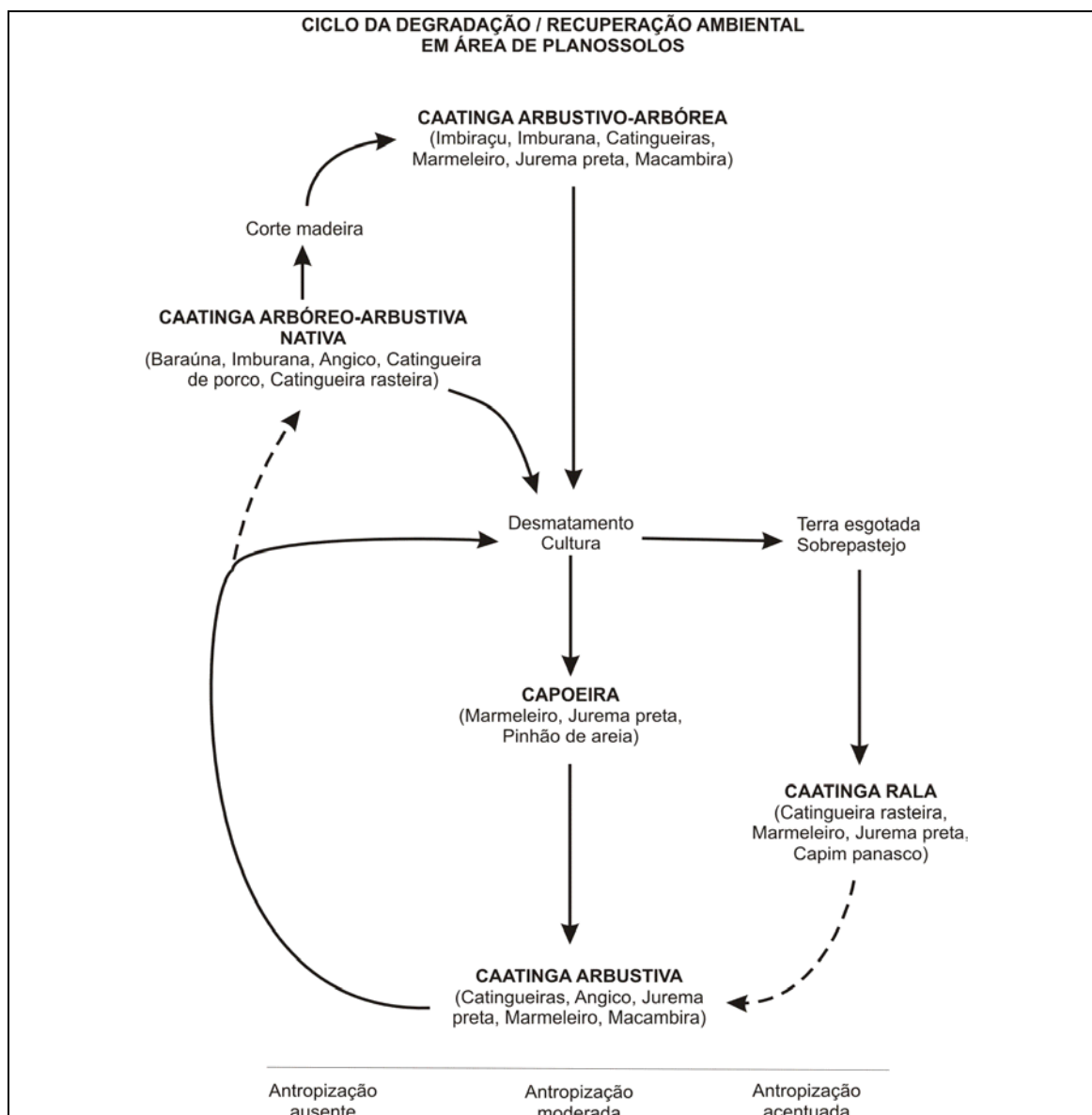


FIGURA 1.10 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de planossolos.

FONTE: Sá et al. (1994).

Neste ambiente o Marmeleiro (*Croton sonderianus*), Jurema preta (*Mimosa hostilis*) e o Capim panasco (*Aristida setifolia*) são as espécies características da reconquista vegetal. Na caatinga de Ouricuri, estes ambientes se localizam no centro da área e estão ocupados exclusivamente por uma caatinga arbustiva. Na Figura 1.11 é mostrado o ciclo para argissolos presentes principalmente no oeste da área.

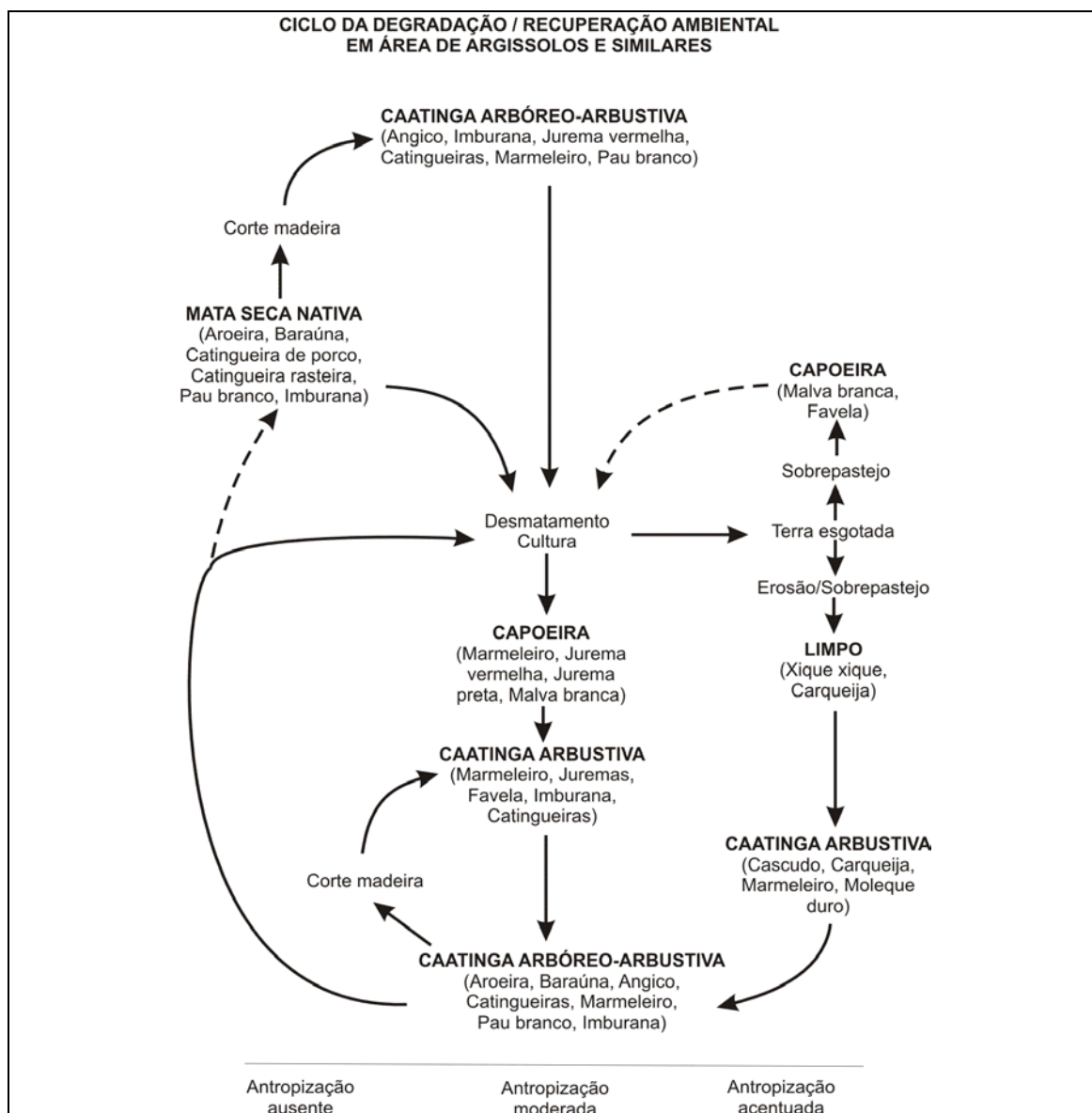


FIGURA 1.11 - Ciclo de degradação/recuperação em áreas de argissolos e similares.

FONTE: Sá et al. (1994).

Na Figura 1.11 apresenta-se um ciclo característico de locais contrastantes com ocorrência de encraves de mata seca em meio a caatinga. Nestes, a degradação extrema produz áreas de lenta recuperação, sendo ocupadas principalmente por Malva branca (*Herissantia crispa*), Carqueija (*Calliandra depauperata*) e Xique-xique (*Pilosocereus sp.*). Como foi apresentado nas figuras anteriores, algumas espécies são indicadoras do estado sucessional dentro do ciclo de degradação/recuperação. Esta condição de

indicadoras está associada ao tipo de solo e à abundância/dominância desta ou, quando se trata de comunidades maduras, da diversidade que compõe a comunidade vegetal.

Na continuação deste Capítulo são revisadas as técnicas que fornecem, a partir do sensoriamento remoto, os indicadores espectrais para o estudo das mudanças da vegetação. Estas extraem a informação radiométrica das imagens orbitais obtidas na porção refletiva do espectro eletromagnético.

1.2.4. Principais Aspectos Radiométricos das Imagens Ópticas Orbitais

Apresenta-se aqui uma revisão dos aspectos radiométricos das imagens. Essas imagens são sobretudo obtidas por intermédio de sistemas sensores colocados a bordo de plataformas orbitais e operando na faixa refletiva do espectro eletromagnético. Esta posição em órbitas de grande altura (centenas de quilômetros) permite a maior estabilidade e repetitividade das tomadas, maior amplitude da faixa imageada e mínimas distorções geométricas. Porém, a dupla participação da atmosfera no sinal captado pelo sensor, dificulta muitas vezes o tratamento dos dados contidos nessas imagens.

Para se ter um sistema sensor estável numa plataforma orbital é necessário considerar diversos compromissos técnicos. Dentre eles, destacam aqui com a taxa de transmissão dos dados coletados para uma estação terrena. Este fator limitante afeta, na fase da especificação do sistema, o número projetado de faixas espectrais, a largura da faixa imageada, a resolução espacial e radiométrica. Esta última é determinada pelas características do conversor analógico/digital que reescala o sinal dos detectores. Este reescalonamento também está estreitamente relacionado com duas características internas do sistema: a sensibilidade e o alcance dinâmico dos detectores.

Os sensores eletrônicos integram um fluxo de fótons, durante um período de exposição eletrônica, resultando numa contagem de fótons. A saída do sistema sensor é um número relacionado com essa contagem de fótons. Dentro do sistema, vários sensores diferentes com a mesma energia recebida, podem ter diferentes ganhos e *offset*. Sendo o *offset* do detector o sinal que este produz mesmo sem fótons incidentes. Este valor de *offset* é produzido pela atividade térmica do sistema eletrônico que gera o sinal internamente. Assim, o ganho está relacionada com a sensibilidade do detector às

mudanças de energia incidente. A saída do sistema detector pode ser relacionada com a energia incidente ou o número de fótons mediante um modelo linear do tipo:

$$L_{\lambda} = \alpha_{\lambda} ND + \beta_{\lambda} \quad (1.1)$$

onde:

L_{λ} = radiância [Wm^{-2}]

ND = número digital da imagem

α_{λ} = coeficientes de calibração do sensor correspondente ao ganho

β_{λ} = coeficientes de calibração do sensor correspondente ao *offset*

Através desta fórmula, segundo Schowengerdt (1997), o valor da energia incidente está definida pelo fator de ganho do detector e um valor aditivo, o *offset* do detector. Esta equação relaciona cada detector de cada banda com o sinal de saída. A tecnologia do sensor e do sistema permite o aumento da sensibilidade às mudanças de energia incidente. Esta melhora técnica permite a diminuição do *range* das medidas radiométricas, permitindo ao sistema reescalonar, um *range* menor e obter melhor resolução radiométrica, como ocorre atualmente com ETM+ em relação com TM, como é apresentado nas guias de usuário NASA (2001) e USGS (2001).

O sistema imageador, ao longo de sua vida útil, sofre variações no desempenho dos detectores. Por esta razão, esta performance deve ser determinada antes do começo da missão e, periodicamente, analisada durante sua operação, para corrigir eventuais falhas e calibrar os dados coletados. A relação entre os dados coletados e os dados reais pode ser representada por modelos matemáticos simples.

As imagens ópticas são compostas com medidas de radiância situadas dentro do chamado espectro óptico de radiação eletromagnética (REM). As imagens ópticas são uma matriz de pixels. Estes são as menores unidades na imagem, representando uma unidade discreta de área no terreno, da qual o fluxo radiante é integrado por um detector. A intensidade de cada pixel corresponde a média de brilho ou radiância. Estas intensidades são medidas eletronicamente pelos detectores do sistema sensor sobre uma dada área no terreno, que corresponde a um pixel. Na Figura 1.12, pode-se observar um esquema representativo do valor de radiância de cada pixel numa imagem óptica. À capacidade do sistema sensor em medir variações de radiância dá-se o nome de resolução radiométrica.

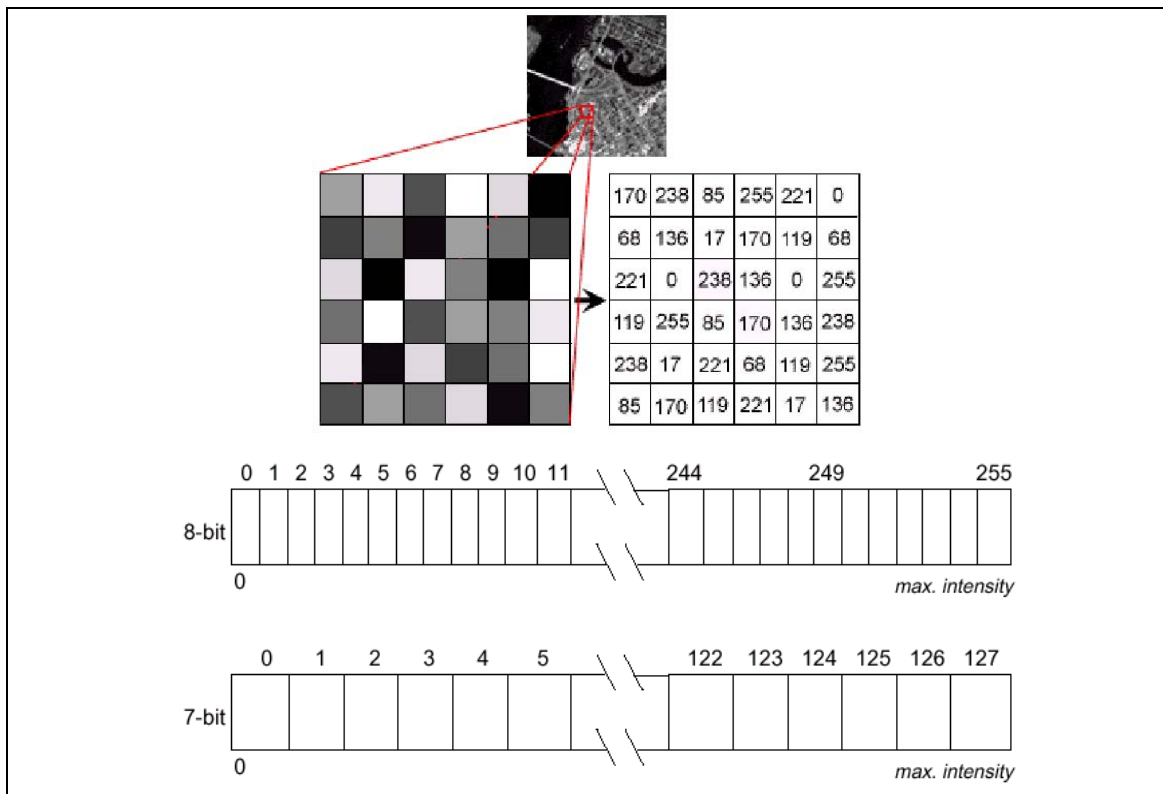


FIGURA 1.12 - Elementos de uma imagem (pixels) e esquema do reescalonamento radiométrico para dados de 7 e 8 bit.

FONTE: CCRS (2001).

A resolução radiométrica do sistema sensor está relacionada ao reescalonamento do *range* dinâmico e ao número de valores possíveis em cada banda gerada pelo sensor. Esta é determinada pelo número de bits em que os dados de energia são gravados e transmitidos pelo sistema sensor. Para dados de 8 *bit*, os valores possíveis estão numa escala de 0 a 255, mas, se os dados são transmitidos num formato de 7 *bit*, o intervalo de valores vai de 0 até 127. A Figura 1.13 ilustra de que forma o sensor mede um sinal contínuo, que é dividido pelo sistema em 256 ou 128 valores.

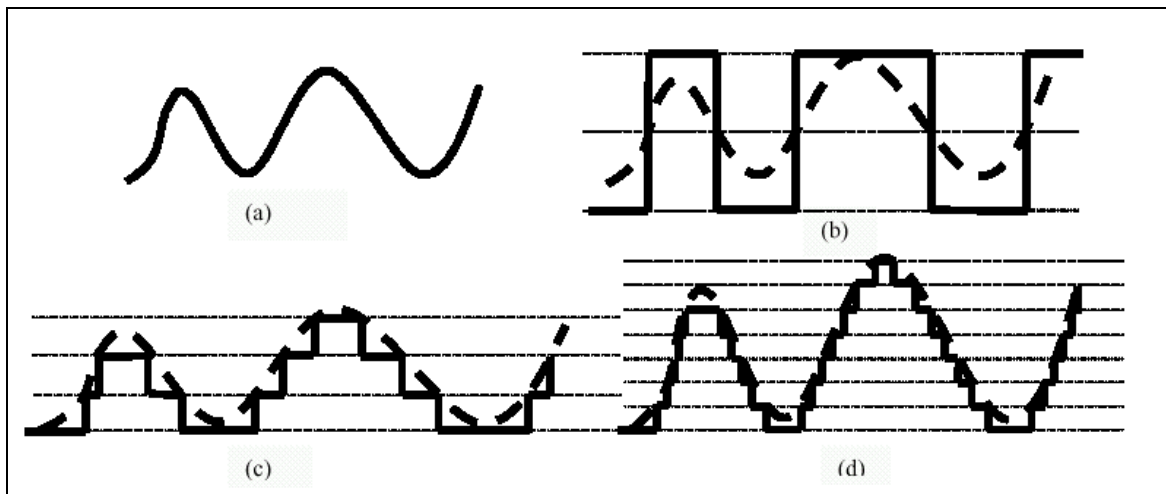


FIGURA 1.13 - Esquema do sinal emitido pelo sensor e resultados do reescalonamento:
 a) sinal analógico; b) 2 níveis com 1 bit, c) 4 níveis com 2 bit; e d) 8 níveis com 3 bit.

As Figuras 1.13 (b), (c) e (d) mostram um esquema deste sinal, quando digitalizadas em 2, 4 e 8 níveis de cinza, respectivamente. Quando o número de níveis de quantização é pequeno, os detalhes do sinal desaparecem na representação digital. Neste caso, dizemos que o sinal digital é mais suave do que o sinal original. À medida que o número de níveis de quantização cresce, a aproximação do sinal original torna-se mais precisa. Em geral, quanto maior o número de níveis, maior o detalhe da informação coletada pelo sistema sensor.

Cada nova geração de sensores mostra aperfeiçoamentos em relação a seus predecessores. Estes podem estar tanto na aquisição de dados, com na qualidade das imagens. Segundo Lillesand e Kiefer (1994), embora algumas anomalias inerentes aos sensores ainda existam, estas podem ser corrigidas aplicando fórmulas matemáticas, derivadas da natureza destas distorções.

Finalmente, os dados da imagem digitalizada são codificados e transmitidos para a estação de recepção do operador e fornecedor de imagens para os usuários. Os operadores do sistema, através do controle do sensor, obtêm periodicamente o alcance dinâmico dos sensores; o mínimo e máximo sinal, dentro dos quais o sensor é sensível,

fornecendo aos usuários o “ganho” e o “*offset*” do sistema, como parâmetros de calibração do sensor.

Os valores digitais das imagens sem correções podem ser usados para gerar rapidamente produtos para interpretação ou classificações simples. Mas quando precisam ser usados em processamentos com outras imagens, os resultados de tais análises geralmente são incorretos (Robinson, 1982). Esses erros acontecem porque os números digitais não representam quantitativamente os valores físicos reais e são usados apenas por conveniência no processamento de dados. Para adequá-los, segundo Schowengerdt (1997), são utilizadas técnicas de pré-processamento que incluem correções radiométricas, correções atmosféricas e correções de iluminação, cuja descrição em detalhes está apresentada a seguir.

1.2.5. Técnicas de Pré-Processamento

O pré-processamento consiste em minimizar algumas características das imagens digitais que não pertencem à cena imageada, como as produzidas pela natureza do sensor, atmosfera, nuvens, etc. Em primeiro lugar, o sensor obtém a cena com a sua particular geometria de imageamento, o que em geral não é adequada para os usuários das imagens. O uso de imagens em conformidade geométrica é fundamental para a detecção de mudanças. Segundo Bernstein (1983), quando as diferenças nas feições do terreno entre imagens multitemporais são de interesse, é necessário uma correção geométrica extremamente precisa. O registro pode ser feito com uma reamostragem do vizinho mais próximo (*Nearest neighbor*), quando há a necessidade de não alterar os valores originais de cinza. Porém, esta reamostragem possui desvantagens, sendo as principais, as discontinuidades geométricas que podem aparecer na imagem resultante, quando a transformação é complexa. Este efeito não desejado pode ser evitado utilizando como base do registro outra imagem com geometria semelhante, o que diminui a complexidade dos algoritmos de transformação e minimiza as discontinuidades geométricas nas imagens referenciadas. Outro tipo de correção modifica os dados internos das imagens com base em parâmetros extraídos das imagens ou do ambiente, denominada de correção radiométrica, com uma descrição feita a seguir.

1.2.5.1. Correção Radiométrica

Os valores digitais na imagem sem correções podem ser usados para gerar rapidamente produtos a serem interpretados por classificações estatísticas. Mas, quando precisam ser usados em processamentos combinados com outras imagens, os resultados de tais análises geralmente são incorretos, como assinalado por Robinove (1982). Isto porque, os números digitais não representam quantitativamente os valores físicos reais e são usados apenas por conveniência no processamento de dados. Desta forma as correções radiométricas têm a vantagem de permitir a comparação quantitativa de assinatura específica de alvos (Hill e Sturm, 1991).

Para adequar estes dados são utilizadas correções radiométricas, que incluem correções atmosféricas e de iluminação. As atmosféricas são feitas em termos aditivos ou fatores multiplicativos, que relacionam irradiância solar, transparência atmosférica e parâmetros dos sensores utilizados. Estas correções tendem a produzir os valores digitais que forneceriam os mesmos sensores nas mesmas condições de imageamento, possibilitando obter sucesso no mapeamento com imagens multiespectrais (Pons e Solé-Sugrañes, 1994; Boyd et al., 1996). Desta forma, os níveis digitais são relacionados por um modelo linear à intensidade da energia radiante, coletada pelo sensor. Este é o chamado modelo de calibração. Na Figura 1.14, apresenta-se o roteiro em forma de fluxograma, para a conversão dos números digitais da imagem para a reflectância dos alvos.

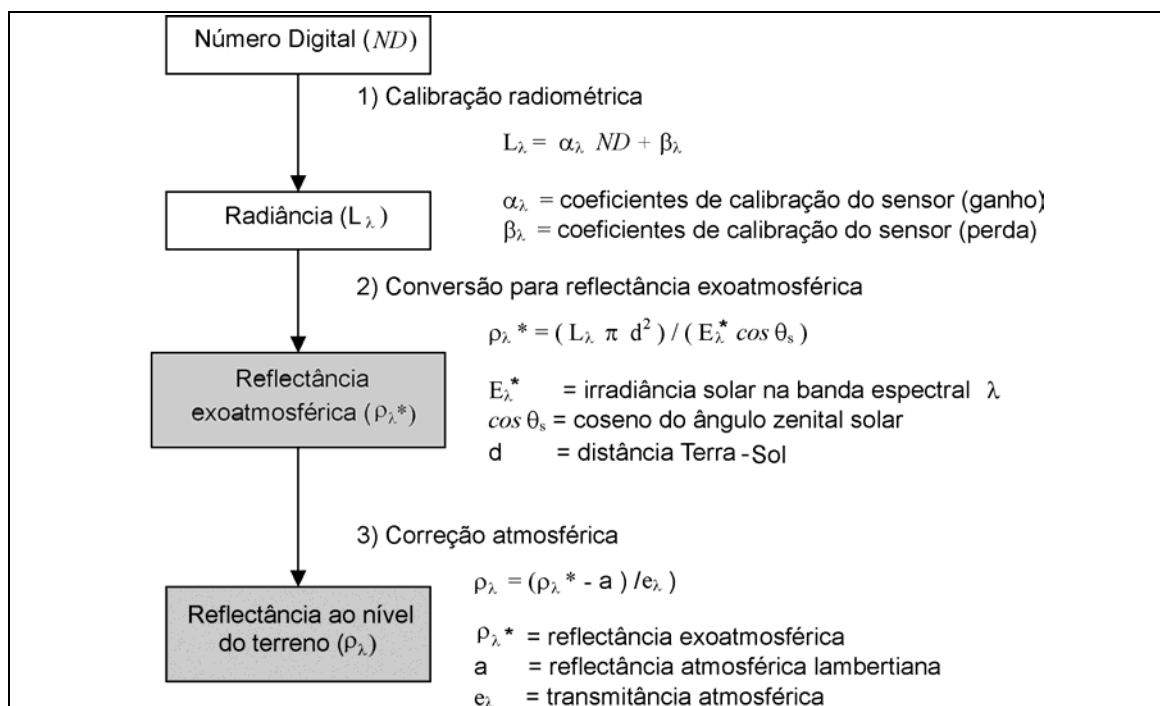


FIGURA 1.14 - Conversão de números digitais para reflectância ao nível do terreno.

Segundo Markham e Barker (1987), a radiância e a reflectância da cena podem ser obtidas através dos valores fornecidos pelo detector. O umbral de radiância é aquele onde o detector começa as medidas (L_{min}) e o valor máximo de radiância é aquele máximo que pode medir (L_{max}). Assim, a radiância espectral está relacionada com a entrada pela abertura do detector, obtendo a reflectância espectral. Por exemplo, o valor de saturação do detector corresponde a uma radiância no sensor de $1,14 \text{ mW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ na banda TM1.

Outro tipo de calibração pode ser utilizado entre imagens de datas distintas. Estas estão baseadas em correlações entre imagens, o que produz uma calibração relativa. Estes tipos de calibrações são também chamados de normalizações ou padronizações, e permitem somente trabalhar com um conjunto de imagens calibradas. Alguns destes algoritmos são simples e somente minimizam as diferenças relativas entre imagens, como os apresentados por Elvidge et al. (1995) e Thome et al. (1997).

Quando são utilizados os parâmetros de calibração, o interesse principal das correções é a intensidade da radiação num intervalo de calibração espectral e espacial dos sensores

(Kelly et al., 1975; Price, 1995). Na Tabela 1.1, apresentam-se os parâmetros de calibração dos sensores dos satélites da série Landsat 5 e 7.

TABELA 1.1- Parâmetros para calibrar as imagens TM e ETM+.

Banda TM	1	2	3	4	5	7
Lmin	0	0	0	0	0	0
Lmax	208,7	390,5	257,5	241,9	33,4	19,4
Banda ETM	1	2	3	4	5	7
Lmin	-6,2	-6,4	-5,0	-5,1	-1,0	-0,35
Lmax	191,6	196,5	152,9	157,4	31,06	10,80
Range TM	208,7	390,5	257,5	241,9	33,4	19,4
Range ETM	197,8	202,9	157,9	162,5	32,6	11,15
Ganho (%)	5	48	38	32	2	42

Nesta Tabela 1.1, pode ser observado que os ganhos relativos de resolução radiométrica nas bandas 2, 3 e 4, que são consideráveis, é da ordem de 35%. Com altos valores relativos significa que o sensor ETM é mais sensível às mudanças radiométricas. Essa mudança implicaria numa maior sensibilidade dos índices de vegetação e de brilho do solo, que poderiam ser gerados a partir destes novos valores.

Além disso, para obter dados com a qualidade exigida pela maioria das técnicas de detecção de mudanças após esta calibração, os valores da imagem devem ser corrigidos de modo a retirar a componente da resposta produzida pela atmosfera.

1.2.5.2. Correção dos Efeitos Atmosféricos

Um aspecto de grande importância a ser considerado na aplicação das técnicas de calibração é o chamado efeito aditivo da atmosfera. Este efeito é inerente aos dados coletados no espectro óptico e pode ser definido como a adição de componentes estranhos ao fluxo de radiância de um alvo. Os principais fatores responsáveis pelo efeito aditivo são a radiância da trajetória e o efeito da iluminação do céu. Embora o problema afete também as imagens obtidas com elevado ângulo de elevação solar, ele é mais dramático nas imagens tomadas com baixo ângulo de elevação como ocorre nas imagens adquiridas no inverno. Assim, estas correções para obter a reflectância ao nível

do terreno são em geral difíceis de serem realizadas e estão baseadas numa suposta homogeneidade do efeito sobre todos os elementos coletados, o que nem sempre é verdadeiro.

Imagens formadas com a energia solar refletida pela terra são bastante sensíveis à interação com a atmosfera. Esta altera os valores de brilho registrados nas imagens, afetando negativamente a qualidade visual das mesmas. O conhecimento dos principais mecanismos de interação da energia radiante com atmosfera é fundamental para a análise, tanto em produtos analógicos quanto digitais, principalmente no que se refere ao critério de seleção de bandas espectrais para fins específicos.

A atmosfera promove degradação na qualidade dos dados de sensores remotos. Este efeito varia em função dos diferentes intervalos espectrais correspondentes às bandas dos sensores em operação e diminui com o aumento do comprimento de onda (Richards (1993), sendo maior nos comprimentos mais curtos na região do azul, como pode ser observado na Figura 1.15.

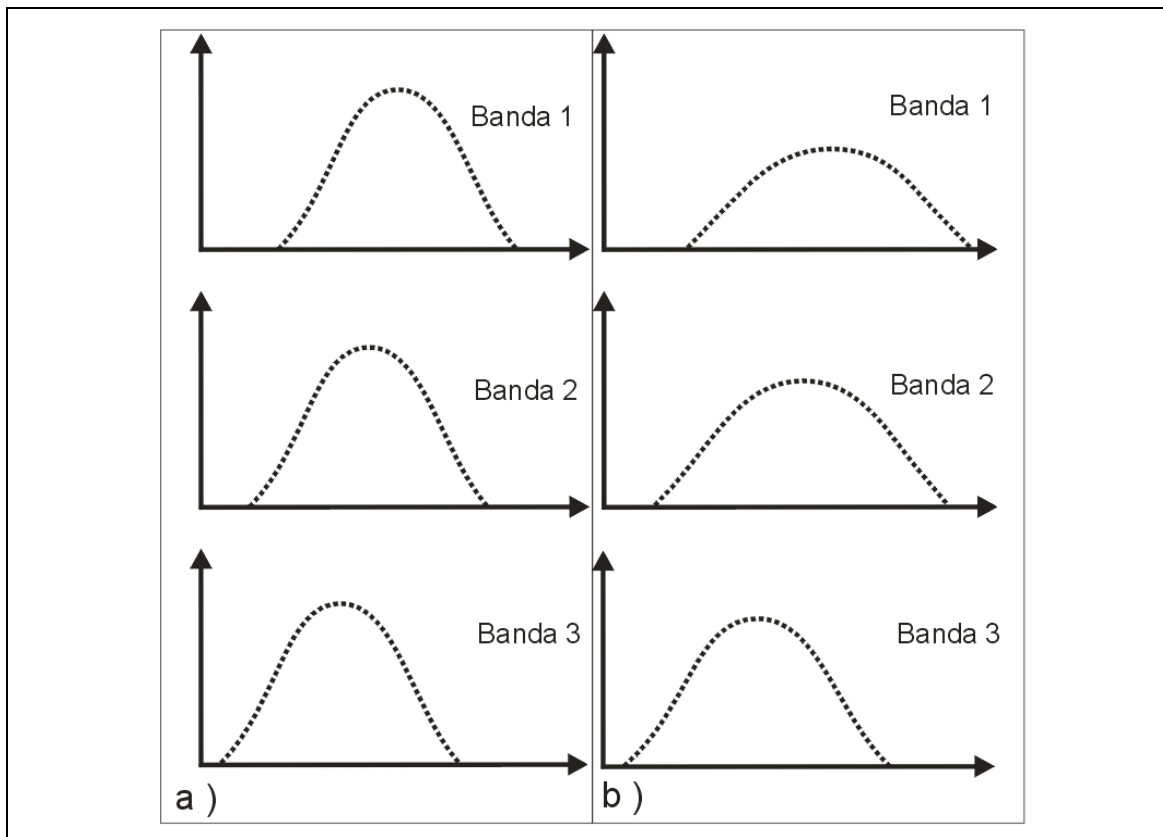


FIGURA 1.15 - Efeito da atmosfera sobre os níveis de cinza das três bandas TM/Landsat do visível; a) simples efeito aditivo; e b) efeito real (combinação de aditivo e multiplicativo).

FONTE: Adaptado de Richards (1993).

De acordo com Chavez (1988), os processos de absorção e espalhamento atmosférico atuam, respectivamente, para subtrair e adicionar os valores de brilho ao sinal coletado por sensores remotos, a partir de alvos da superfície terrestre. Para Cracknell e Hayes (1991) e Mather (1987), o caráter aditivo do espalhamento atmosférico é o principal processo de introdução de distorções radiométricas em dados de sensoriamento remoto, sendo a sua magnitude inversamente proporcional ao comprimento de onda. No caso de imagens digitais, é possível aplicar técnicas de minimização dessas distorções. Essas técnicas consistem basicamente em calcular a reflectância dos elementos no terreno,

estimando a transmitância atmosférica e o valor aditivo do espalhamento como se apresenta na formulação a seguir (Equação 1.2):

$$\rho_{\lambda} = (\rho_{\lambda}^* - a) / e_{\lambda} \quad (1.2)$$

ρ_{λ}^* = reflectância exoatmosférica

a = reflectância atmosférica lambertiana

e_{λ} = transmitância atmosférica

Um modelo de correção atmosférica mais simples foi apresentado por Chavez (1988), e consiste em procurar dentro da cena imageada um pixel de valor mínimo que pode ser sombra ou água limpa. Este pixel, para ser representativo, deve estar próximo ou dentro da sub-área de interesse. Porém, como mostrou Chavez (1996), em alguns casos não é possível encontrar pixels escuros e esta técnica pode ser substituída por correções relativas entre as imagens de interesse, como a apresentada por Hall et al. (1991). Atualmente estão em operação sensores chamados corretores atmosféricos, que coletam uma imagem estreita em faixas espectrais específicas, quase simultaneamente, na mesma órbita do Landsat ETM+. Esta imagem complementar permite que o efeito atmosférico possa ser avaliado e corrigido ao longo da imagem. Isto permitiria a correção do efeito atmosférico sobre toda a cena considerando que esta não é homogênea. Estes efeitos são produzidos principalmente pelos processos de absorção e espalhamento atmosférico. A seguir, serão detalhados os principais aspectos relacionados aos processos de interação da energia radiante com atmosfera, com base em Mather (1987) e Lillesand e Kiefer (1994).

1.2.5.2.1. O Processo de Espalhamento Atmosférico

Este processo é causado por partículas ou moléculas gasosas de vários tamanhos, variando desde microscópicas até gotas de chuva. Elas podem ser, tanto naturais quanto causadas pela ação do homem (poluição industrial, poeira, etc.). Estes são geralmente importantes considerando que a radiação solar percorre a atmosfera terrestre duas vezes: uma, desde o sol até sua superfície; e outra, desta até o sensor. Durante essa passagem,

a radiação eletromagnética interage com materiais particulados, suspensos na atmosfera e com moléculas de constituintes gasosos, através de dois processos principais: o espalhamento (deflexão dos raios luminosos) e a absorção (conversão da energia eletromagnética radiante em energia termal no interior das moléculas). Ambos processos físicos são dependentes do comprimento de onda. Há porções do espectro onde tais efeitos são muito fortes e não é possível obter dados para formar as imagens ópticas. As regiões livres desses efeitos constituem as janelas atmosféricas (regiões de alta transmitância da radiação), nas quais o sensoriamento remoto ocorre efetivamente. O principal efeito do espalhamento atmosférico é aumentar o grau de névoa da imagem, provocando conseqüentemente, a redução do contraste. Isso reduz o potencial de detectar feições distintas na imagem. É importante distinguir dois mecanismos principais de espalhamento: o seletivo e o não seletivo. No caso do espalhamento seletivo, pode ocorrer tanto o espalhamento “Rayleigh”, quanto o “Mie”.

O chamado **espalhamento “Rayleigh”** é produzido por partículas e moléculas muito pequenas, com raio muito menor do que o comprimento de onda de interesse. Esse efeito é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda. Conseqüentemente, as regiões do espectro óptico com menores comprimentos de onda são mais afetadas pelo espalhamento do que aquelas com maior comprimento de onda. Assim, as imagens da região do azul (0,4 - 0,5 μm) apresentam-se tipicamente com aspecto brumoso devido ao espalhamento atmosférico, enquanto naquelas da região do vermelho (0,6-0,7 μm) tal efeito é bem menor.

O **espalhamento “Mie”** é causado por partículas cujo raio varia entre 0,1 a 10 μm , que estão aproximadamente no mesmo intervalo de comprimento de onda do espectro óptico. Entre as partículas dessas dimensões estão a fumaça e as poeiras. Do mesmo modo que o espalhamento “Rayleigh”, este tipo de espalhamento também varia inversamente com o comprimento de onda. Todavia, o expoente não atinge à quarta potência, variando desde 0,7 a 2 μm . Ou seja, o espalhamento “Mie” também afeta os menores comprimentos de onda mais intensamente do que os maiores porém não tão fortemente como o espalhamento “Rayleigh”.

O **espalhamento não seletivo** (não dependente do comprimento de onda) é produzido por partículas cujo raio interno excede 10 μm , incluindo gotas de chuva e fragmentos de

gelo nas nuvens. Todos os comprimentos de onda do visível são igualmente espalhados por essas partículas. Assim, a cor resultante é a branca (proporções iguais de azul, verde e vermelho), o que pode ser observado nas nuvens e nevoeiros.

Ainda como parte deste mecanismo de espalhamento, o grande efeito dos aerossóis no deserto é uma questão pouco considerada, porém atuante até $0.7\mu\text{m}$ (Bowker e Davis, 1992). Ele produz condições de turbidez no caminho da radiação e dificulta o uso de imagens orbitais ópticas. Embora existam muitos modelos para corrigir os efeitos atmosféricos somente poucos consideram as partículas de poeira. Em Bowker e Davis (1992) foram comparados o modelo de transferência radiativa LOWTRAN, muito utilizado para correções atmosféricas e o modelo ERIM que considera a poeira do deserto. Foi observado um desempenho menor no LOWTRAN que no modelo ERIM. Este último considera que a poeira do deserto diminui com o aumento da altura e com a diminuição do ângulo zenital. Segundo Escadafal (1996), a melhora destes algoritmos para regiões áridas é fundamental para obter melhores resultados com sensoriamento remoto.

1.2.5.2.2. O Processo de Absorção Atmosférica

Ao propagar-se pela atmosfera, a REM (Radiação Eletromagnética) é absorvida seletivamente pelos seus constituintes (vapor d'água, monóxido de carbono, ozônio e partículas de poeira, dentre outras). O principal atenuador da faixa do visível ($0,4\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$) é o ozônio, embora possa ser desprezado por estar em uma proporção muito pequena na atmosfera. Em algumas regiões do infravermelho, do ultravioleta e do microonda, a absorção é o processo dominante. Na Figura 1.16 é mostrado o efeito da atmosfera sobre a REM incidente.

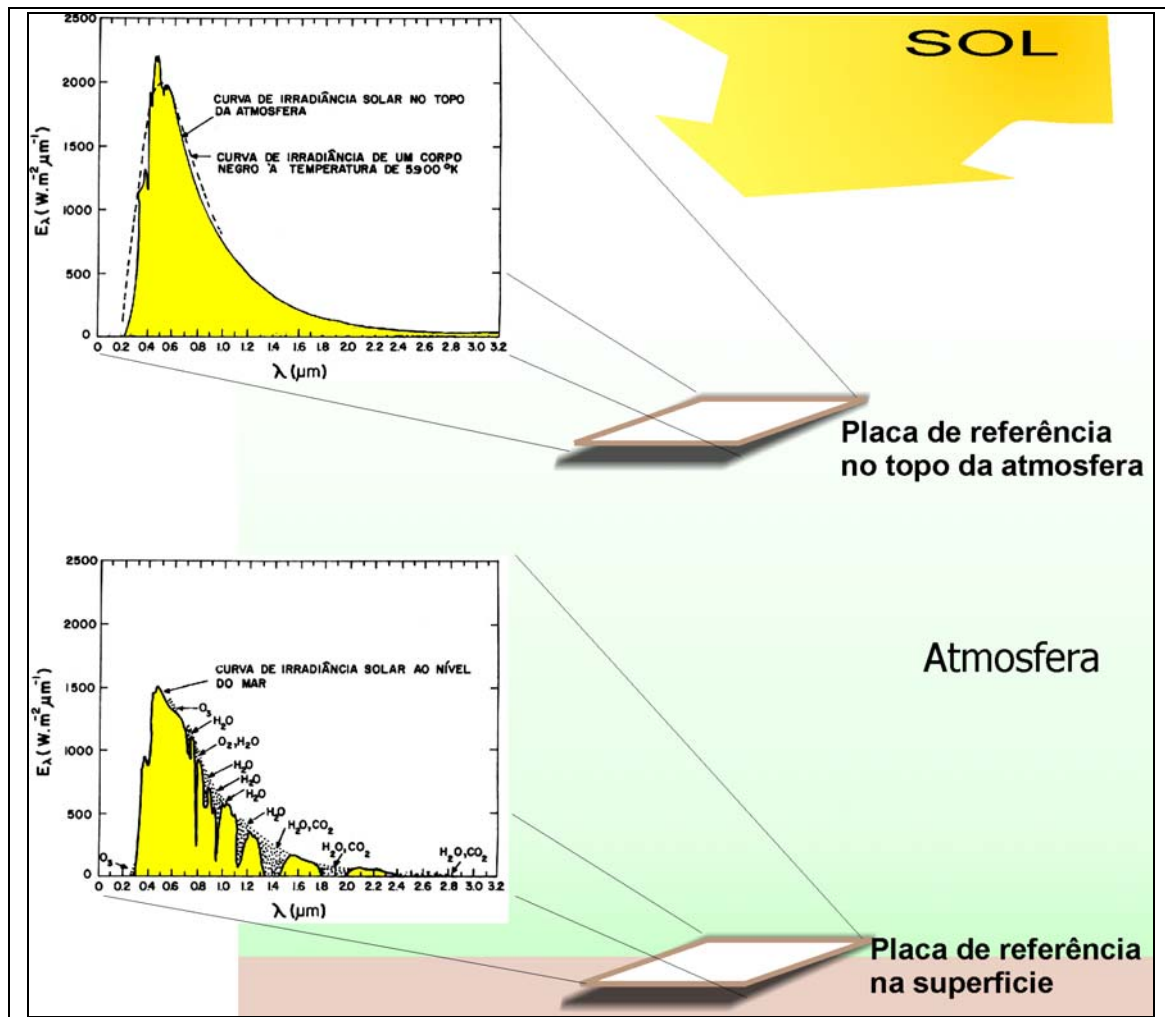


FIGURA 1.16 - Efeito da atmosfera sobre a natureza da REM incidente.

Observa-se na parte superior da Figura 1.16, a curva espectral da radiação solar incidente, medida com espectrorradiômetro, sobre uma placa padrão no topo da atmosfera notando-se a forma contínua da curva. Na parte inferior da Figura 1.16, na curva medida sobre uma placa padrão na superfície, nota-se a forma descontínua da curva devido às bandas de absorção próprias dos elementos constituintes da atmosfera, como oxigênio, nitrogênio, vapor de água, poeira, etc. Este fenômeno de absorção atua significativamente em comprimentos de onda do infravermelho. Isto quando combinado com o efeito aditivo atuante principalmente no visível afeta a análise espectral. Este efeito indesejado afeta os índices espectrais obtidos mediante operação algébrica como a razão de bandas, conforme pode ser observado a seguir.

1.2.5.3. Efeito das Correções sobre os Índices de Vegetação

Em razão das calibrações modificarem em maior proporção os valores digitais de bandas do visível do que as do infravermelho, os índices calculados combinando estas bandas são geralmente os mais afetados. Os índices de vegetação e os de umidade de solos, calculados com bandas não calibradas não produzem resultados satisfatórios (Guyot e Gu, 1994). Mais ainda, quando estes índices são usados em processamentos multitemporais ou para detecção de mudanças, a precisão dos resultados pode ser inaceitável. Chavez e MacKinon (1994) mostraram que bandas calibradas do visível são mais sensíveis às mudanças no semi-árido do que o NDVI - Normalized Difference Vegetation Index. Karnieli et al. (2001) apresenta um novo índice de vegetação, o chamado AFI - Atmosphere Resistant Index, que segundo o autor, é relativamente independente do efeito atmosférico, mas quando o interesse é a comparação de índices entre datas, somente a correção radiométrica pode garantir bons resultados.

As técnicas de pré-processamento estão relacionadas com os parâmetros que alteram o imageamento. A influência desses fatores podem ser minimizada para melhoria da qualidade das imagens com a finalidade de obter bons resultados nos processamentos digitais posteriores. Os parâmetros considerados são geométricos e atmosféricos. Os geométricos, que variam e interferem na iluminação de uma cena, compreendem: o ângulo zenital do sol e o ângulo de visada do sensor. Bowker et al. (1992) enfatizam que o aumento do ângulo zenital do sol proporciona diminuição da irradiação na superfície de um alvo e conseqüentemente uma diminuição na porcentagem de energia refletida pelo mesmo.

Os parâmetros do sensor satélite Landsat 5 têm sofrido alterações por efeito das mudanças orbitais, principalmente do horário do imageamento, porém estes fatores afetam de forma homogênea a cena e de forma similar aos efeitos atmosféricos. Portanto, para minimizar estes efeitos, podem ser utilizados métodos de análise digital apropriados como a Análise por Componentes Principais (ACP).

Segundo Chuvieco (1990), a atenuação dos efeitos do espalhamento atmosférico é importante em três tipos de situações: (1) ao pretender realizar combinações lineares entre bandas, visto que o efeito do espalhamento atmosférico é uma função do

comprimento de onda; (2) ao relacionar os níveis de cinza com determinados parâmetros físicos, como temperatura, biomassa, umidade do solo, etc. e (3) na realização de estudos multitemporais. Esta última situação, provavelmente, é a mais afetada pelas condições atmosféricas, com o sucesso do estudo multitemporal estando estreitamente relacionado com a qualidade da correção atmosférica. Atualmente, existem algumas técnicas de análise multitemporal, que em vez de tentar corrigir os efeitos atmosféricos simplesmente minimizam o efeito da variabilidade nas condições da atmosfera.

1.2.5.4. Correção Geométrica

A correção geométrica é um conjunto de operações matemáticas cujos principais objetivos são reorganizar os pixels de uma imagem, de acordo com um sistema de projeção geográfica, e remover as distorções geométricas sistemáticas introduzidas pelo sistema sensor. A correção geométrica não deve ser confundida com o registro de uma imagem em relação a outra, ou registro imagem-imagem. Embora, este tipo de registro utilize os mesmos algoritmos que a correção geométrica, não tem por objetivo a transformação para um sistema de projeção geográfica. Neste, uma das imagens é usada como referência para a relocação dos pixels da segunda imagem (Guillesspie, 1992; Mather, 1987; Richards, 1993).

O uso de imagens em conformidade geométrica ou registradas imagem-imagem é fundamental para casos como a detecção de mudanças. Segundo Bernstein (1983), quando o objeto de interesse são as diferenças nas feições do terreno entre imagens multitemporais é necessária uma correção geométrica ou um registro imagem-imagem extremamente preciso, recomendando valores de erro tão baixos como 0.2 pixels. Isto somente pode ser alcançado quando se trabalha com áreas de tamanho pequeno o que obriga muitas vezes a dividir uma área em subáreas para obter bons resultados.

Finalmente, a redefinição dos pixels na imagem de saída é produto da interpolação a partir dos dados da imagem de entrada. Este procedimento, comumente referido como reamostragem, pode ser feito com três técnicas: vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica. O registro com reamostragem do vizinho mais próximo (*Nearest neighbor*) é recomendado para não alterar os valores originais de cinza. Porém,

esta reamostragem pode formar descontinuidades geométricas na imagem resultante. Este efeito não desejado pode ser minimizado, utilizando como base do registro uma imagem com geometria semelhante. Isto diminui a complexidade da transformação e minimiza as descontinuidades geométricas nas imagens referenciadas.

Esta última opção é apropriada quando se utilizam imagens de um mesmo satélite o que, segundo Stephen e Cocks (1991), altera pouco a qualidade radiométrica das imagens para a detecção de mudanças. Estas operações de pré-processamento estão orientadas para se obter produtos de qualidade adequada para posteriores processamentos. A seguir são detalhados alguns processamentos digitais de interesse para este trabalho.

1.2.6. Técnicas de Detecção de Mudanças para Estudo da Paisagem

A função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração de informações contidas nas imagens, para posterior interpretação. O resultado desse processo é a produção de outras imagens contendo informações específicas, como as de mudanças ambientais (Crosta, 1993). Os processamentos digitais para a detecção de mudanças atualmente são variados.

A detecção de mudanças vem sendo uma das maiores aplicações de sensoriamento remoto orbital. As técnicas desenvolvidas para este fim fornecem bons resultados a baixo custo e para diversas escalas, sobretudo em áreas que apresentam uma dinâmica espaço-temporal de fenômenos facilmente observáveis através do comportamento radiométrico das imagens multitemporais. As técnicas de detecção de mudanças podem ser agrupadas segundo seu objeto de estudo em: uso da terra; cobertura vegetal; corpos de água; e atmosfera. Sendo também diferentes, em função dos seus objetivos. Segundo Green et al. (1994), as técnicas podem ser utilizadas para: (a) tornar possível a detecção ou seleção da informação que contém as feições de interesse; (b) medir mudanças; (c) atualização; (d) estimar mudanças.

A principal característica destas técnicas digitais é que elas se baseiam nas diferenças reais, não subjetivas, do estado da superfície imageada, o que tem correspondência direta com as variações espectrais da imagem digital. Os aspectos radiométricos das imagens digitais atuais oferecem a possibilidade de usar técnicas de detecção de

mudanças simples, rápidas e precisas, através de programas de computador (Fung, 1990). O sucesso da sua aplicação depende quase inteiramente de um registro geométrico preciso entre datas conforme enfatizado por Lillestrand (1972) e Igbokwe (1999). Atualmente, existe uma ampla variedade de programas para tratamento de imagens, muitos dos quais oferecem módulos específicos para detecção de mudanças. A seguir, apresentam-se as técnicas mais simples, a primeira visual cujo uso é simplesmente obter uma aproximação da situação da cena.

1.2.6.1. Detecção de Mudanças por Composição Multitemporal

Esta técnica exploratória consiste basicamente da combinação RGB de três bandas uma de cada data estudada. Desta forma é obtida uma composição colorida multitemporal, podendo-se usar uma banda espectral de cada data ou uma banda índice de cada data. Apresentam-se na composição resultante as não mudanças em tons de cinza ou em cores com saturação próxima a zero e as mudanças aparecem em cores, cuja saturação está relacionada com a intensidade das mudanças entre datas. As cores são produtos das combinações RGB de cores que representam cada data, embora no sistema IHS o eixo de saturação zero pode ser considerado um eixo de não mudanças. Sader e Winne (1992), por meio da composição colorida de imagens multitemporais de NDVI, observaram a dinâmica das mudanças na cobertura florestal. Esta técnica é aplicada simplesmente para visualizar o comportamento temporal de feições isoladas, e para o seguimento qualitativo de alguns processos como mudanças das formas litorâneas, rios, entre outros, como apresentados por Ulbricht e Heckendorff (1998).

1.2.6.2. Detecção de Mudanças por Álgebra de Imagens

Este grupo de técnicas inclui operações algébricas simples entre imagens de diferentes datas. Algumas destas são a diferença e razão simples. Também podem utilizar-se combinações simples destas operações, entre datas. Somente é de interesse para este trabalho a diferença entre imagens, sejam diferentes bandas de uma mesma data ou a mesma banda de diferentes datas. Esta operação de subtração serve para realçar diferenças radiométricas diminutas refletidas por pequenas diferenças no comportamento espectral de determinados alvos quando suas características mudam. Ela

é muito dependente da qualidade dos pré-processamentos. Por isso, como mencionado por Coppin e Bauer (1996) e Coppi et al. (2004) obter bons resultados com imagens de diferentes sensores através desta técnica é muito difícil, porque ela depende de pré-processamentos complicados para compatibilizar conjuntamente os dados entre datas e entre sensores. Porém, esta técnica produz bons resultados ao ser aplicada sobre bandas resultantes de índices. O algoritmo da diferença se expressa da seguinte forma:

$$\Delta X_{ijk} = X_{(2)ijk} - X_{(1)ijk} \quad (1.3)$$

Sendo as variáveis:

ΔX_{ijk} = diferença entre os valores dos pixels da linha i e coluna j das

datas 2 e 1, na banda K , da cena X ;

$X_{(1)ijk}$ = valores dos pixels da imagem da cena na data 1 ;

$X_{(2)ijk}$ = valores dos pixels da imagem da cena na data 2 ;

Na Figura 1.16 observa-se o roteiro mais usual para esta técnica como apresentado por Singh (1986). A imagem diferença é obtida na aplicação do algoritmo da Equação 1.3. Nesta, os valores maiores significam ganho de reflectância na segunda data, o que na faixa espectral do vermelho significa perda de cobertura vegetal e no infravermelho próximo possui o significado contrário ou seja ganho de cobertura. Os valores menores da imagem detecção significam portanto ganho de vegetação quando obtido através do vermelho, ou recuperação como apresentado na Figura 1.17.

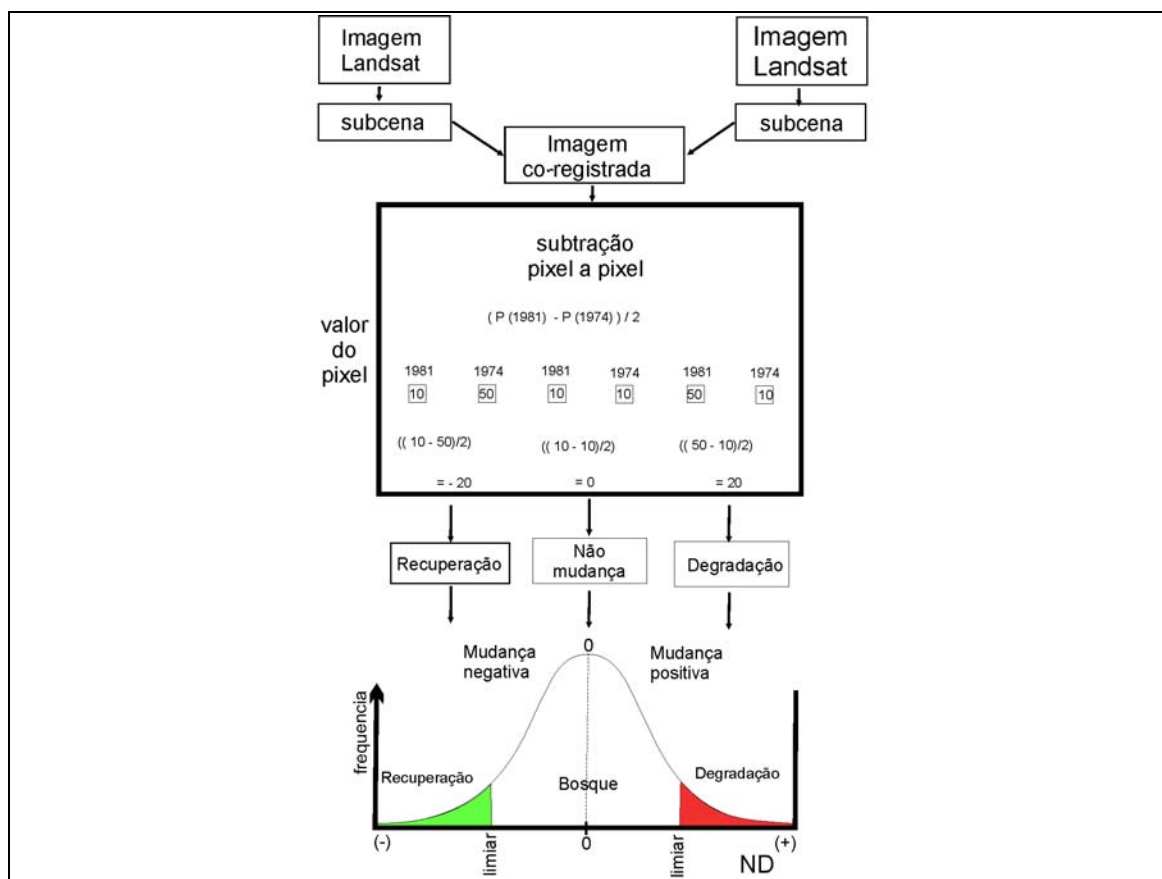


FIGURA 1.17 - Roteiro da técnica de diferença simples.

FONTE: Adaptado de Singh (1986).

A metodologia apresentada na Figura 1.17 geralmente não consegue fazer que o centro da distribuição de frequências da imagem detecção venha a coincidir com o zero. Isto ocorre pela dificuldade de compatibilizar os dados entre datas com correções radiométricas adequadas. Geralmente, o centro do fatiamento pode ser definido através do cálculo da moda da imagem detecção com base na afirmação de Chaves e MacKinnon (1994) “usualmente, em ambientes áridos e semi-áridos, o número de pixels cujo valor muda de forma significativa é estatisticamente pequeno, o que não modifica a dinâmica geral e a forma característica da distribuição da imagem”.

Para completar esta técnica e obter um mapa das mudanças, deve ser feito o fatiamento e rotulação da imagem diferença. Esta é uma imagem em modo contínuo que deve ser transformada em imagem discreta (temática). Para isto simplesmente deve-se considerar

que os números digitais em torno de 0 são valores de não mudança e as posições dos limiares são resultado da estimação visual do limite entre temas na imagem.

A posição dos limiares de mudança da imagem diferença pode ser empírico quando a definição do limiar é feita por tentativas (Jensen, 1996). Também, esta limiarização pode ser paramétrica como apresentado por Fung e LeDrew (1988). Esta pode ser baseada numa estatística de posição a partir da variância da cena total da imagem diferença. Assim os pixels com intensidades próximas da média identificam áreas onde não ocorreram mudanças. As áreas de mudança são determinadas na imagem diferença pela identificação dos pixels cujos valores estejam acima ou abaixo de um valor de corte ou limiar. Eastman e Fulk (1993) recomenda valores de limiares entre mudança e não mudança da ordem de um desvio padrão.

A técnica por álgebra de imagens é melhorada sensivelmente se as imagens são corrigidas radiometricamente, conforme demonstram Robinove (1982), Goeffrey (1997) e Guyot e Gu (1994), em razão do aumento da discriminação da vegetação usando o NDVI após a correção radiométrica e atmosférica. Hill e Sturm (1991), Joria e Ahern (1991), Wong et al. (1997) e Karnieli (2001) afirmam que efetuar as correções radiométricas é a única forma de obter precisão para o monitoramento da vegetação. Esta técnica pode ser usada tanto com índices de vegetação, como com bandas produzidas através da análise de modelo de mistura com desempenhos similares (Elmore et al., 2000). Segundo Crosta (1993), a diferença simples entre imagens de diferentes datas com a mesma banda pode ser utilizada para identificar diferentes tipos de cobertura vegetal e detectar padrões de mudanças entre imagens. Tuecker (1979), Singh (1986) e Accioly et al. (2001), na comparação da vegetação em diferentes datas encontraram adequada à diferença de índices de vegetação, através da formulação:

$$R = ((NDVI_1 - NDVI_2) + 1) * 127 \quad (1.4)$$

sendo:

R= imagem detecção de mudanças.

Segundo Green et al. (1994), esta técnica simples, permite detectar bem a perda de vegetação de grande porte, mas é muito afetada quando a cena é complexa, por razões de variações de umidade e/ou grandes diferenças no ângulo de elevação solar.

1.2.6.3. Análise por Componentes Principais - ACP

A análise por componentes principais é uma técnica de transformação linear que é utilizada com diferentes propósitos: realce de bandas, decorrelação de bandas, classificações, compressões de dados, simulação de bandas pancromáticas, até detecção de mudanças (Conese et al., 1988). Aqui será analisado o seu uso para detecção de mudanças e analiticamente seu algoritmo de funcionamento será tratado como uma rotação controlada por matriz de covariância – RCMA; este nome foi utilizado para incluir a ACP na família algébrica dos algoritmos de rotação.

Antes de mais nada, deve ser mencionado que a análise estatística envolvida na aplicação desta técnica confere-lhe algumas particularidades, entre as quais a de eliminar a maior parte das diferenças de baixas frequências do conjunto da imagem, realizando uma calibração relativa automática entre elas, conforme apresentado por Richards (1993). Esta particularidade minimiza a dependência de seus resultados com a qualidade das correções atmosféricas ou normalizações entre imagens. Assim, esta técnica permite obter resultados aceitáveis quando não são possíveis as calibrações atmosféricas. Esta técnica pode ser utilizada para adequar as imagens iniciais (somente fornecer informação relevante), permitindo que uma segunda técnica de detecção de mudanças gere o mapa das mudanças. Porém, uma outra forma de aplicar a ACP permite obter diretamente um mapa de mudanças. Neste último caso a técnica necessita daquelas bandas espectrais com informação adequada para o estudo do fenômeno de interesse, podendo somente supervisionar o funcionamento inicial da técnica. Esta é chamada de análise por componentes principais seletivas e produz os melhores resultados (Chavez e MacKinnon, 1994).

A análise por componentes principais é uma transformação linear, a qual produz uma rotação dos eixos cartesianos do espaço de atributos da imagem em relação ao eixo de máxima variância ou espalhamento (eixo principal). Nesta transformação atribui-se a primeira componente principal (1ª CP) ao novo eixo cartesiano paralelo ao eixo principal de espalhamento (FIGURA 1.18). A direção é representada pelo eixo principal da elipse, descrevendo a correlação entre as imagens da primeira e segunda data.

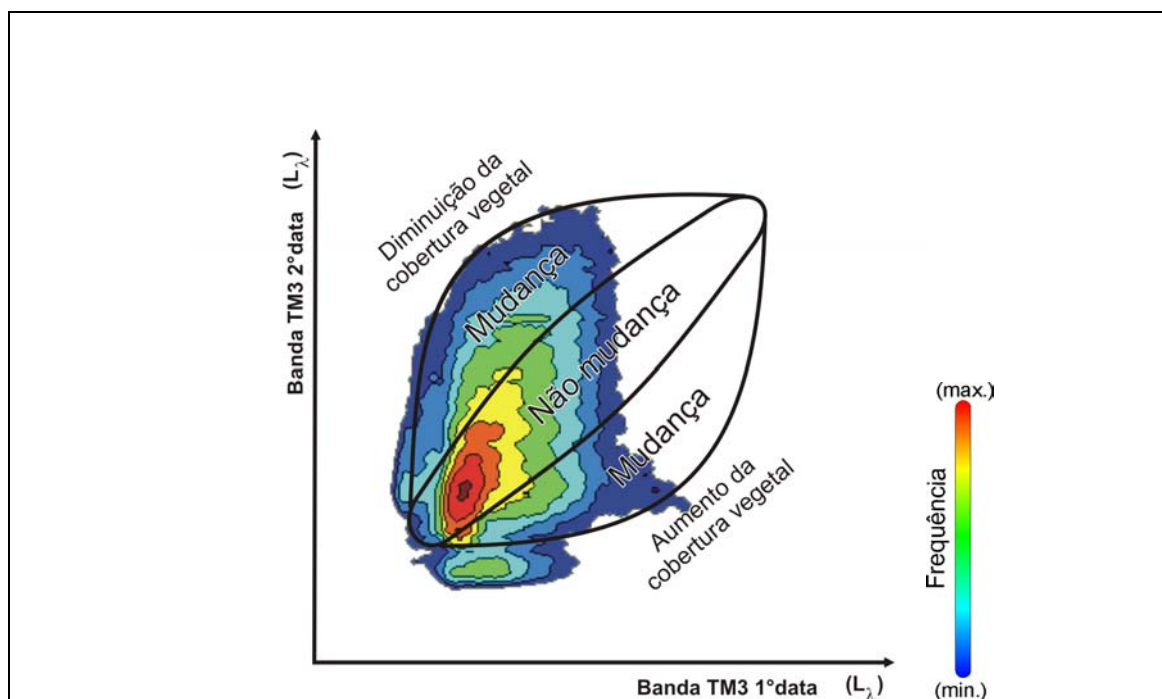


FIGURA 1.18 - Distribuição hipotética do espaço de pixels para duas datas TM/Landsat com a Banda 3 (região do vermelho).

A direção do segundo eixo (2ª CP) é a que possui a maior variância ou espalhamento em direção ortogonal à direção da primeira componente. Portanto, a transformação por componentes principais tem como função primordial determinar a extensão de correlação entre bandas em uma mesma cena e removê-la através de uma transformação matemática apropriada. Assim, são geradas novas imagens, cuja função de densidade de probabilidade terá eixos ortogonais ou independentes. A rotação aplicada permite que na ACP, mediante um simples fatiamento dos histogramas das novas bandas (1ª CP e 2ª CP), venha a se obter uma classificação da variabilidade associada. A variabilidade da 1ª CP está associada à cobertura vegetal que caracteriza o tipo de caatinga e a 2ª CP às mudanças na cobertura vegetal entre as duas datas. De maneira analítica, segundo Banon (1992), tal transformação pode ser analisada da seguinte forma:

$$[g'(x)] = [g(x)] \cdot A \quad (x \in E) \quad (1.5)$$

Onde num espaço de atributos (E), $g'(x)$ é a transformada de $g(x)$, os coeficientes da transformação são representados pela matriz real A de dimensão $p \times p$. Dado que $A =$

$[\alpha_{ij}]$, e p o número de vetores na transformação ou dimensão do espaço, para todo $p \geq q$ a função será:

$$\mathbf{g}'_j = \sum_{i=1}^p \alpha_{ij} \cdot \mathbf{g}_i \quad (j = 1, 2, \dots, q) \quad (1.6)$$

estas transformadas (\mathbf{g}'_j) formam as q primeiras componentes principais de \mathbf{g} , e os elementos da diagonal da matriz transformada, os autovalores. A cada autovalor corresponde um autovetor. Os autovalores são ordenados em ordem decrescente, representam o comprimento dos eixos das CPs de uma imagem medidos em unidades de variância. O ordenamento dos autovetores depende da ordem obtida com os autovalores. A primeira componente está relacionada com o primeiro autovalor e assim sucessivamente.

Ao se trabalhar com duas bandas apenas, $\mathbf{g}'_1 = 1^{\text{a}}\text{CP}$ e $\mathbf{g}'_2 = 2^{\text{a}}\text{CP}$, têm-se que:

$$1^{\text{a}}\text{CP} = \alpha_{11} \cdot \mathbf{g}_1 \text{ banda 1} + \alpha_{21} \cdot \mathbf{g}_2 \text{ banda 2} \quad (1.7)$$

$$2^{\text{a}}\text{CP} = \alpha_{12} \cdot \mathbf{g}_1 \text{ banda 1} + \alpha_{22} \cdot \mathbf{g}_2 \text{ banda 2} \quad (1.8)$$

Pode-se observar que 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 não têm um significado físico no terreno.

Esta operação caracteriza uma rotação de um sistema de eixos ortogonais. Os autovetores representam, geometricamente, a direção, orientação e a escala dos novos eixos ortogonais, sendo o primeiro orientado ao longo da linha de maior variância. Os autovetores representam as direções dos eixos das CPs. Assim, graficamente, o primeiro autovetor da 1ª CP é o cosseno do ângulo de rotação aplicado na transformação. Os autovalores correspondentes são numericamente iguais à variância dos escores da respectiva componente principal. O conjunto de autovetores e autovalores é conhecido como auto-estrutura.

A segunda componente principal (2ª CP) é de suma importância para o estudo das mudanças na cobertura do terreno, sendo que há grande correlação entre bandas de diferentes datas. Esta correlação em geral diminui na medida em que a diferença de tempo entre as datas é maior e há maiores mudanças nas feições imageadas. Isto se pode observar quando são representados graficamente os níveis de cinza correspondentes à duas bandas num sistema de eixos ortogonais. Caso a correlação tenha valores muito altos, todos os pontos se localizariam próximos à reta de regressão entre as duas imagens. A correlação naturalmente nunca é perfeita, mesmo que a diferença de tempo entre as datas de aquisição das imagens seja muito pequena. Isto ocorre por vários motivos, entre os quais; condições de iluminação e visada; variações no desempenho do sensor e no processo de correção geométrica das imagens.

Note-se que a correlação entre a informação contida numa banda e outra de datas diferentes é necessária para se obter consistência de resultados quando no trabalho com séries temporais. Isto limita o uso da técnica em áreas onde a mudança é de grande proporção de informações, como ocorre no uso para estudos agrícolas. Porém, algumas vantagens da técnica de análise por componentes principais de imagens multitemporais foram sinaladas por Jiaju (1988) e por Chavez e MacKinnon (1994). Estes autores a utilizaram pela capacidade de realçar a informação da dinâmica entre as datas e a possibilidade de obter resultados sem a necessidade de calibrações e correções atmosféricas.

A análise por componentes principais em estudos de desertificação já foi utilizada por Lee et al. (1990). Em estudos multitemporais, segundo Richards (1993), a utilização desta técnica explora a correlação das bandas de imagens multitemporais de regiões que sofrem modificações substanciais na paisagem. No Brasil foi utilizado por Carrilho (1996), Sirtoli (1998) e Maldonado (1999), para detecção de mudanças na cobertura do terreno, obtendo com esta abordagem, resultados satisfatórios com pouco gasto de tempo computacional. Em algumas destas aplicações foram utilizadas apenas duas bandas de duas datas diferentes, o que segundo Lee et al. (1990); Byrne et al., (1980); Richards (1993); e Eastman e Fulk, (1993), ajuda a evitar as dificuldades da interpretação que ocorrem com o uso de maior número de bandas. Portanto, trata-se de uma Análise Seletiva, a qual segundo Chavez e MacKinnon (1994) e Bruzzone et al.

(2000), é mais apropriada para estudos específicos com imagens que contêm heterogeneidade de alvos, como no caso do semi-árido. Um tipo de rotação controlada já foi usada por Chi (2003), em ambiente litorâneo de China, para obter uma correção atmosférica empírica, a que este autor denominou de “Bare-sand soil line method”. Continuando com a família de algoritmos lineares de rotação, será apresentada na seqüência a rotação controlada. Este tipo de técnica funciona na mesma forma que a ACP mas controlando a rotação através de dados externos aos parâmetros das imagens, neste caso com dados do levantamento de campo.

1.2.6.4. Rotação Radiométrica Controlada por Eixo da Não Mudança-RCEN

Esta técnica é produto de uma modificação da ACP, aplicada para controlar os valores dos autovetores e autovalores calculados para cada componente principal. A RCEN é uma transformação linear, a qual produz uma rotação dos eixos ortogonais do espaço radiométrico da imagem. Esta aplica-se em correspondência ao eixo formado pela reta de regressão da radiometria dos pixels de não mudança identificado previamente no terreno. Este eixo descreve a correlação radiométrica entre os pixels de não mudança nas imagens da primeira e segunda data. Nesta técnica, o ângulo de rotação (α) é obtido como o arco-tangente do coeficiente de regressão linear do eixo de não mudança, como apresentado na Figura 1.19.

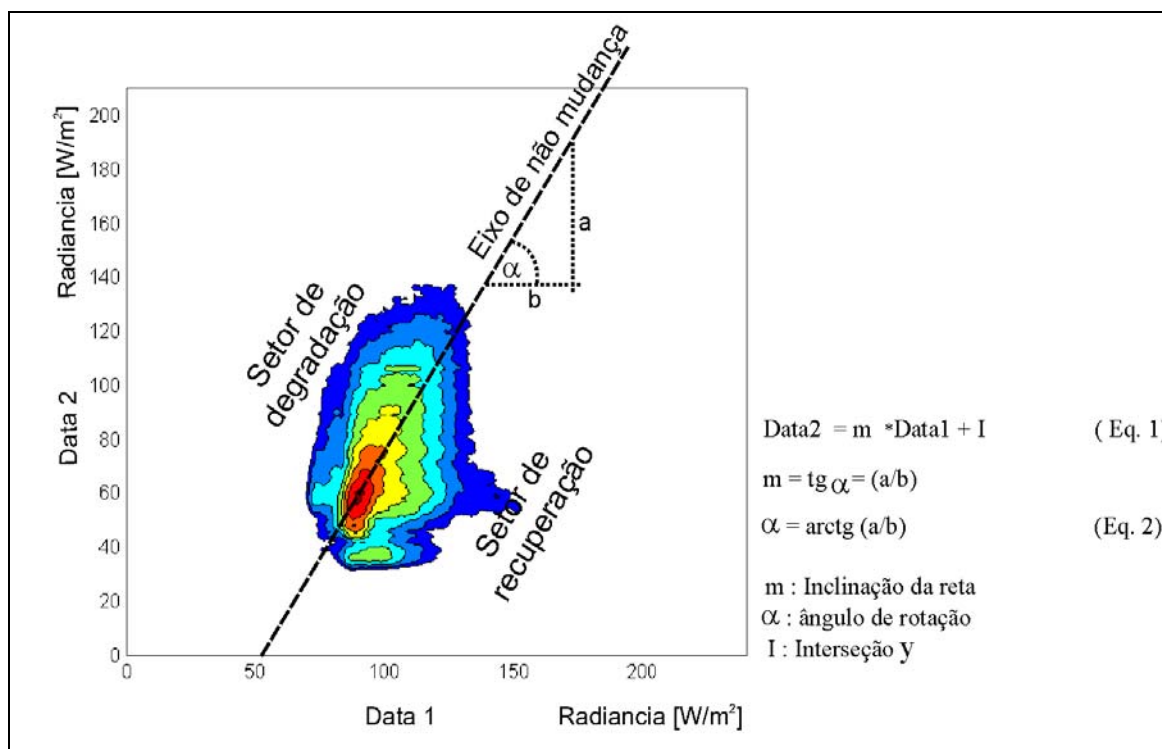


FIGURA 1.19 - Diagrama analítico das medidas para obter os parâmetros da rotação.

Desta maneira a imagem detecção é gerada utilizando uma das equações do algoritmo de rotação simples:

$$X_{Det} = -X_1 \sin \alpha + X_2 \cos \alpha \quad (1.9)$$

sendo :

X_{Det} : Imagem Detecção de mudanças

X_1 : banda na primeira data

X_2 : banda na segunda data

α : ângulo de rotação

Observa-se que não existe nenhum parâmetro de escala nos termos da fórmula, como ocorre com os autovalores da ACP. Esta definição de não mudança está baseada na interpretação de indicadores de campo, que permitem inferir esta condição de não mudança, como estrutura madura da cobertura vegetal ou um estado de desertificação. Quando o espaço de tempo entre as imagens aumenta, a tarefa de identificar os pixels da

não mudança pode ser difícil. Neste caso, o ângulo de rotação apropriado pode ser determinado por métodos de iteração (repetição), que consideram em conjunto os pixels de não mudanças, de degradação e de recuperação, conforme apresentado em Maldonado et al. (2001a). Esta técnica iterativa aumentou a precisão obtida pela ACP, passando de um Kappa igual a 0,72 para 0,76. Embora a precisão do controle da rotação baseada no eixo de não mudança não tenha aumentado, como mostrado em Maldonado (2001a), a simplicidade da técnica e a maior dependência dos dados de campo, faz dela preferível à ACP. Como continuidade ao presente trabalho, atualmente está se estudando o aumento da precisão através da modificação da forma e da posição dos limiares de não mudança.

Como conclusão do item pode-se indicar que a rotação radiométrica controlada por eixo da não mudança é uma técnica simples baseada em álgebra facilmente acessível a usuários menos treinados. Esta permite que a detecção de mudanças seja operacionalizada sem domínio dos pré-processamentos complicados que atualmente são habituais. A seguir, serão revisados alguns aspectos das abordagens do sensoriamento remoto, orientadas aos estudos dos recursos naturais no semi-árido e aos processos de degradação e desertificação.

1.2.7. Experiências de uso das imagens orbitais em estudos da cobertura vegetal e uso da terra no semi-árido

Na literatura há extenso número de trabalhos relativos ao uso de dados orbitais na caracterização temática de uso da terra em regiões tropicais, muitos desses realizados sob domínios de relativa e constante condição pluviométrica em áreas brasileiras, como de Almeida et al. (1996) e Watrin et al. (1998). Em áreas de pluviosidade escassa e irregular no semi-árido do nordeste brasileiro citam-se os trabalhos de Carvalho (1986), Aligula et al. (1997), Teotia et al. (1998), Cheng et al. (1998) e Wamicha (1997) e Trodd e Dougill (1998) que avaliaram o efeito da ação antrópica em terras de pastoreio e o efeito da perda da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido do norte da África. Guangwei (1997) e Perumal et al. (1997) estudaram a degradação de terras integrando sensoriamento remoto e SIG, no trópico semi-árido da China e no semi-árido da Índia, respectivamente.

Os estudos da cobertura da terra vêm se valendo das características espectrais dos sensores orbitais. Mediante estudos sistemáticos vêm se empregando técnicas de processamento de imagens com combinações de bandas espectrais específicas, obtendo resultados significativos na discriminação e caracterização dos alvos sobre a superfície da terra.

Carvalho (1986), estudando a região do semi-árido brasileiro, utilizou imagens MSS/Landsat para discriminar tipos de caatingas, obtendo sete de dezesseis tipos, definidos a níveis mais detalhados de observação. Os dezesseis tipos estruturais, nos quais está baseado o presente trabalho, foram separados por aquele autor, com levantamentos fitossociológicos detalhados de campo e análise de fotografias aéreas. Neste trabalho foi definida a época seca como a mais apropriada para discriminar os tipos de vegetação natural e a época úmida para discriminar o solo exposto.

Sá (1991) aplicou dados do TM/Landsat para o mapeamento de tipos de caatinga na época seca, obtendo resultados satisfatórios mediante o uso combinado de imagens do Sensoriamento Remoto orbital e aéreo, numa abordagem multiestágio. Kazmierzac (1993) ao trabalhar com índices de vegetação, encontrou dificuldades para discriminar tipos de caatinga, devido à homogeneização da resposta espectral da vegetação na época úmida. Naqueles trabalhos, os autores também verificaram ser a época seca mais apropriada para a discriminação e classificação da caatinga. Portanto, características importantes para a discriminação da vegetação são melhor observadas na época da seca, quando esta se encontra pouco coberta pela folhagem, e principalmente, para evitar influência da umidade localizada devido a chuvas, na resposta característica da cobertura vegetal quando observada com dados sensoriados. O fato da estação da seca ser a mais apropriada para o estudo da cobertura vegetal do semi-árido está relacionado com a perda de folhas das plantas e com a penetração e interação da luz na estrutura do dossel; deste modo, os sensores ópticos obtêm maior informação sobre a estrutura vertical da vegetação.

Os estudos da cobertura vegetal, que incluem terras agrícolas do semi-árido, precisam de métodos de avaliação que considerem o sistema de produção agrícola local. Este sistema produtivo, itinerante, abrange terras em uso e em pousio. À margem do sistema encontram-se as terras abandonadas, as de vegetação natural e os terrenos abertos

dedicados à pecuária. Para avaliar o uso da terra com precisão há necessidade de quantificar as mudanças diretas provocadas pelo uso intensivo da terra ou corte raso, bem como as terras em diferentes estágios dentro do ciclo agrícola local. Na literatura há extenso número de trabalhos em regiões semi-áridas como os de Aligula et al. (1997), Wamicha (1997), Guangwei (1997) e Perumal et al. (1997) e Teotia et al. (1998), que estudaram a degradação de terras.

Outros autores, como Akibode (1996) e Hanan (1996), estudando o aumento da severidade do clima no Sahel - África por efeito das mudanças na cobertura vegetal causada pelo incremento da população humana e da pecuária, encontraram dificuldades para a caracterização temática das mudanças por causa do efeito atmosférico, que em geral possui características complexas nos ambientes muito degradados. Isto, segundo Gillette (1986), em razão do elevado aporte de poeira atmosférica nestas áreas e do alto albedo dos alvos que aumentam a contaminação dos pixels vizinhos, diminuindo nas imagens ainda mais o contraste entre mudanças.

A exatidão da detecção de mudanças é um item vital para implantar um processo operacional de um sistema de monitoramento. Neste sistema, a propagação dos erros, desde as detecções de mudanças individuais até o resultado final do monitoramento, é a principal dificuldade para uma adequada exatidão nos resultados, como assinalam Lunetta et al. (1981), Stow (1990) e Congalton e Green (1999). Estes autores afirmam que a exatidão final para monitoramento pode ser inaceitável, quando esta é expressa como produto da multiplicação das exatidões das informações de base. Este panorama aparentemente inevitável pode ser melhorado através da procura de indicadores de mudanças confiáveis, que permitam ponderar a precisão do monitoramento sobre a análise das imagens atuais.

1.2.8. Obtenção da Acuracia do Mapeamento por Análise Kappa

Esta é uma técnica multivariada discreta, que determina se uma matriz de confusão é significativamente diferente de outra obtida de forma aleatória (Aronoff, 1982; Bishop et al., 1975). O objetivo da aplicação desta análise Kappa é obter o parâmetro estatístico K, que é considerado uma medida de concordância entre os dados reais e da classificação (representados na diagonal principal da matriz de confusão) e as

ocorrências indicadas nos totais das colunas e linhas. O coeficiente *Kappa* situa-se tipicamente entre 0 e 1, onde 1 indica o completo acordo, e quando multiplicado por 100, dá a percentagem da medida de exatidão da classificação. Conforme Landis e Koch (1977), a avaliação a partir do coeficiente *Kappa* pode ser realizada com base na Tabela 1.2.

TABELA 1.2 - Avaliação segundo o coeficiente *K*

Qualidade da detecção	K
Péssima	< 0
Ruim	0 - 0.20
Acurácia razoável	0,20 - 0,40
Acurácia moderada a boa	0,40 – 0,60
Acurácia muito boa	0,60 – 0.80
Acurácia excelente	0,80 – 1,00

FONTE: Landis e Koch (1977).

Para qualificar os resultados das técnicas de detecção deste trabalho foi adotado o critério simplificar a análise comparativa como aconselha Congalton e Green (1999), segundo a categorização da Tabela 1.3.

TABELA 1.3 - Qualidade das cartas segundo o Índice K.

Qualidade da detecção	K
Acurácia pobre	< 0,40
Acurácia moderada	0,40 – 0,80
Acurácia excelente	0,80 – 1,00

FONTE: Modificada de Landis e Koch (1977).

Diversos autores entre eles Congalton & Green (1999) consideram inaceitáveis valores de K menores de 0.60, embora reconheçam que este valor deve ser analisado conjuntamente com a variabilidade das classes mapeadas. Na etapa metodológica seguinte os resultados dessa análise Kappa podem ser ainda avaliados através de um teste de significância do ajuste dos dados, teste estatístico Z, para comparar as diferenças entre performances.

1.2.9. Técnicas de Amostragem

As técnicas de amostragem são agrupadas em dois grandes grupos: “Amostragem aleatória” e “Não aleatória”. Caso a técnica deva ser submetida a uma rigorosa análise estatística, a amostragem deve ser aleatória, mas, se a técnica deve manter-se dentro de limites práticos e econômicos, com a população subdividida, a amostragem será não aleatória (sistemática ou seletiva), segundo IBGE (1992). A amostragem não aleatória seletiva é aquela na qual é estabelecida arbitrariamente a localização das unidades amostrais, nos mapas, imagens ou campo. Este critério arbitrário normalmente é baseado nas condições de acessibilidade, ou mesmo na habilidade do observador em perceber que determinados locais da área são representativos da população sob estudo.

O tipo e tamanho ideal das unidades amostrais são aqueles que representam com boa precisão, segundo os objetivos, o total da área inventariada (Goldsmith, 1986). Esta amostragem pode ter como principal objetivo temático, a classificação fisionômica-estrutural da vegetação. E, secundariamente a obtenção de informação relevante para estimar a dinâmica da cobertura vegetal. Para isto, adota-se o sistema de classificação fisionômico-estrutural da vegetação, a que segundo Küchler e Zonneveld (1988), é altamente flexível, organizada em forma hierárquica e de ampla aplicação mundial. Isto, satisfaz a necessidade de aplicar a mesma técnica de amostragem em duas formações vegetais semi-áridas diferentes; o Chaco árido ocidental (Argentina) e a Caatinga do sertão de Pernambuco.

Zonneveld (1989) estima que para caracterizar a vegetação são suficientes: cinco (5) parâmetros estruturais, doze (12) fisionômicos, e incorporar na descrição, parâmetros climáticos, bióticos e históricos. Os **Parâmetros Estruturais** são; tipo de dossel (fechado, aberto); espaçamento das árvores (uniforme ou irregular); estratificação (enumeração); descrição de cada estrato (altura). Já os **Parâmetros Fisionômicos** são: altura e distribuição das trepadeiras e epífitas, características dos troncos; formas de vida especiais em cada estrato; periodicidade da folhagem; estação de queda de folha, forma da folha, formas de vida do sub-bosque; a composição florística de cada estrato. Para satisfazer estes requerimentos variados o tipo de amostragem utilizado no presente estudo, em áreas de vegetação natural, foi o “*transecto em linha*”. Maldonado (1999)

fez uma análise do desempenho dos métodos de “*transecto em linha*” versus “*transecto em faixa*”, verificando em campo alguns aspectos da operação de amostragem. A principal dificuldade para fazer uma amostragem em faixa é a natureza lenhosa e espinhenta da vegetação, que dificulta o deslocamento lateral da trena. Esta dificuldade é provocada pela densidade arbustiva e a frequência de espinhos o que chega a quebrar as trenas metálicas. Isto é diminuído com o uso do “*transecto em linha*” favorecendo ainda uma perturbação mínima da vegetação ao longo da trena, eliminando o trabalho de abrir uma nova picada através da vegetação lenhosa, minimizando sobremaneira o tempo e o esforço de amostragem.

1.3. Descrição das Áreas de Estudo

As áreas de estudo selecionadas estão situadas na chamada “Grande diagonal semi-árida latino-americana”, definida como região de terras secas ou áridas tropicais/subtropicais sul-americanas, que se estende de sudoeste à nordeste, desde o sul de Argentina e Chile até a região nordestina brasileira. Esta diagonal abrange desertos, semidesertos, e regiões semi-áridas de transição para outras mais úmidas. As regiões semi-áridas apresentam cobertura vegetal do tipo savanas espinhosas tropicais e estepes subtropicais espinhosas com verões chuvosos, entre outras. Estas regiões são subdivididas internamente seguindo aproximadamente os valores da precipitação anual.

As áreas de estudo se localizam em locais representativos das condições do semi-árido sul-americano. A área brasileira, se localiza no leste do município de Ouricuri, no sertão do Estado de Pernambuco, na região Nordeste de Brasil, com uma área de 90Km², entre as coordenadas 8° 00' - 8° 07'S e 39° 45' - 39° 53'W. Nesta área foram desenvolvidas as técnicas de levantamento de campo e de detecção de mudanças. Estes desenvolvimentos foram aplicados na área-teste no “Valle Fértil”, Província de San Juan, porção centro oeste de Argentina, com uma área de 216km², centrada a 32° 30' de latitude sul e 64° 00' de longitude oeste, como é apresentado na Figura 1.20.

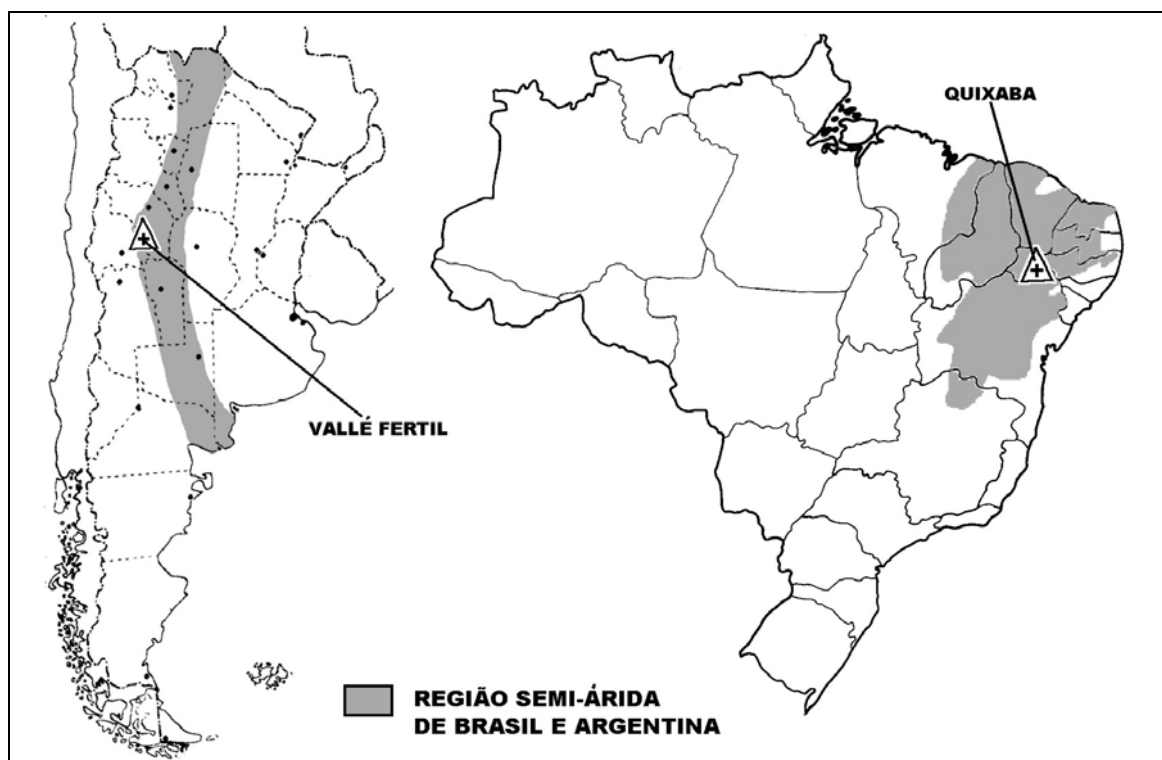


FIGURA 1.20 - Áreas de estudo nas terras secas sul-americanas.

FONTE: IADIZA (1992) e IBGE (1992).

Esta área brasileira possui como referência o povoado de Quixaba no Norte sobre a BR 318 que une Ouricuri com Parnamirim. Esta área está inserida na Bacia do Rio Brígida, ocupando parte dos municípios de Ouricuri, Bodocó e Parnamirim na Região do sertão pernambucano. Totaliza uma superfície aproximada de 190 Km² (14 x 14km). Ela foi selecionada por ser representativa da caatinga submetida a processos de degradação e estar localizada numa zona de transição entre semi-árido seco ao extremamente seco. As dimensões da área foram estendidas somente com fins de incluir duas barragens, no norte a de Quixaba e no sul a de Jacaré. Isso foi necessário para o desenvolvimento do trabalho.



FIGURA 1.21 - Localização da área de estudo de Ouricuri na região do sertão do Estado de Pernambuco.

Nesta área o uso da terra predominante é a pecuária extensiva de bovinos e caprinos, associada às culturas de forrageiras como a palma e capim bufel, e ainda a uma agricultura de subsistência itinerante e de vazante, como plantios de feijão, milho e mandioca. A maior parte da área é recoberta por uma vegetação natural de porte arbóreo baixo e denso, sendo que em seu quadrante SE, sob condições climáticas mais áridas, domina uma estrutura arbórea-arbustiva aberta.

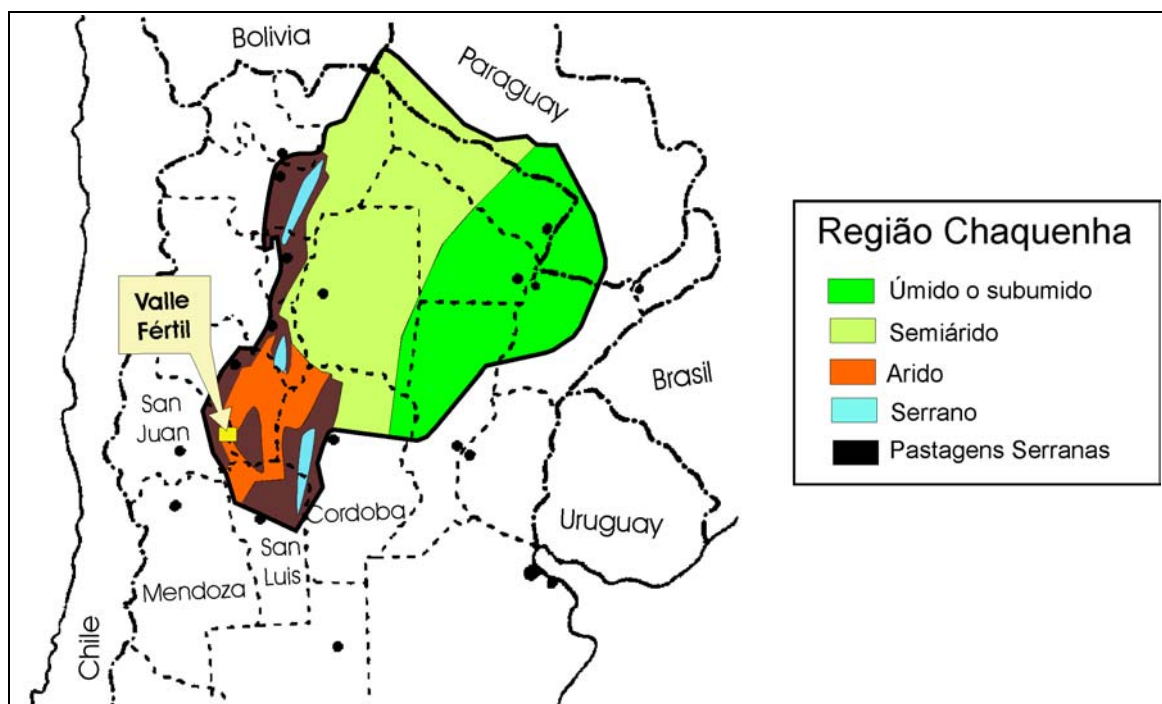


FIGURA 1.22 - Localização da área de teste de Valle Fértil na região do Chaco árido.

FONTE: Karling et al. (1994).

A área argentina de Valle Fértil no centro-oeste argentino (FIGURA 1.22) ocupa uma paisagem onde domina uma vegetação do tipo savana estépica submetida ao impacto de atividades agrícolas, (em solos frágeis, silte-argilosos), de atividades de pastoreio extensivo e de exploração lenheira. Esta área se encontra, segundo Cabrera (1994), na Província Fitogeográfica do Chaco Árido e tem marcada similaridade com a caatinga brasileira. Os regimes dos rios dependem das precipitações durante a estação chuvosa e os picos de descarga estão relacionados com a ocorrência de uma chuva ou de uma sucessão de chuvas em escala local. Uma vez que a precipitação terminou, o vazamento e a recarga da água do subsolo voltam rapidamente a zero. No seguinte item serão caracterizadas as fisionomias encontradas nas áreas brasileira e argentina, e algum paralelismo entre elas de quanto a ocorrência de algumas famílias de plantas.

1.3.1. Fisionomia e Estrutura da Caatinga e do Chaco Árido

O conceito de Fisionomia está relacionado com a aparição simultânea e repetida de determinadas formas ou conjuntos de formas vitais, que configuram a aparência ou

fisionomia da vegetação. Este conceito de classificação da vegetação permite a comparação das duas áreas, mesmo que floristicamente diferentes. Neste item são apresentadas algumas das fisionomias de interesse das áreas de estudo. Estas ocupam, na área brasileira, grande diversidade de complexos de Caatinga, mas na área argentina somente o “complexo planície florestal”. Estas áreas foram estudadas em Carvalho (1986), Ortiz et al. (1993) e Dalmazo e Marquez (1999). Pode-se estabelecer uma certa semelhança fisionômica entre as duas áreas. Porém, existem algumas homologias entre o papel e a origem de algumas espécies de famílias do chaco e da caatinga. Por exemplo o elemento arbóreo dominante da família *Apocinaceae* na fisionomia arbóreo arbustiva é na caatinga a espécie *Aspidosperma pirifolium* (Pereiro) e no chaco a *Aspidosperma quebracho-blanco* (Quebracho). Na ocupação de áreas degradadas por superpastoreio, o gênero de gramíneas *Aristida* possui o mesmo papel em ambas as áreas, sendo que na caatinga domina a *Aristida setifolia* (Capim panasco) e no chaco a *Aristida adsencionis* (Seitilla), ambas dispersas pelo gado bovino e caprino entre os cascos. O gênero *Cassia* da família *Fabaceae* subfamília *mimosoideae* é pioneira na ocupação de terrenos modificados, na caatinga *Cassia excelsa* (canafístula) e no chaco a *Cassia aphylla* (Pichana). E as espécies da família *Fabaceae* subfamília *caesalpinoideae*, *Caesalpinia pyramidalis* (Catingueira) e no chaco com *Caesalpinia guilliesi* (Lagaña de perro) são freqüentes nas áreas investigadas, respectivamente. As analogias podem ser estabelecidas também entre duas famílias, a de *Croton sondlerianus* (Marmeleiro) da *Euforbiaceae* e a família *Zigofilaceae* de *Larrea divaricata* (Jarilla), ambas bem representadas em uma área e quase ausente na outra, mas com o mesmo papel de formar arbustais densos em áreas degradadas em recuperação. A seguir descrevem-se as faciações da caatinga e do Chaco árido, bem como tipos de uso da terra face a ocupação humana nas áreas.

1.3.1.1. Fisionomia Aclareirada

Esta fisionomia agrupa alguns tipos estruturais como a caatinga aclareirada, a arbórea-arbustiva descontínua, a arbórea e a arbórea clara. A característica dominante é a presença de descontinuidades na formação arbustiva, com baixa ou nenhuma cobertura do solo. Em geral estas clareiras são pobres em gramíneas e quando as condições de

fertilidade permitem, existe uma ocupação herbácea de malváceas do gênero *Herissantia*. Este tipo de fisionomia tem sido descrita em ambas as áreas como produto da ação antrópica, da perda de solos, da erosão, e principalmente, pela ocupação de solos degradados como em alguns argissolos (Sá et al., 1994). Por sua vez no Chaco árido argentino esta fisionomia inclui o tipo estrutural denominado Chaco arbóreo-arbustivo aclareirado, cuja característica dominante é a presença de descontinuidades no estrato arbustivo, com baixa cobertura do solo. Estas clareiras têm sido descritas como produtos da erosão profunda nas vizinhanças, o que interrompe o escoamento superficial da água de chuva. Ou também por efeito da acumulação de sedimentos finos vindos de áreas com processos erosivos atuantes, e a conseqüente perda da umidade do solo. Outros fenômenos, com a perda de carbono e nitrogênio do solo são associados à ocorrência destas clareiras.

1.3.1.2. Fisionomia Arbórea-arbustiva

No nordeste brasileiro esta fisionomia agrupa os tipos estruturais de Caatinga arbórea-arbustiva contínua e Caatinga arbórea-arbustiva descontínua. O estrato arbóreo está dominado por jurema preta (*Mimosa hostilis*), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*) e o estrato arbustivo pelo pereiro preto (*Aspidosperma pyriformium*). Nesta fisionomia o dominante arbóreo é o mesmo do chaco árido, um elemento do gênero *Aspidosperma*, como já foi dito anteriormente. Agrupa os complexos arbóreos decíduos e semidecíduos, dos tipos estruturais de Chaco arbóreo-arbustivo contínuo e Chaco arbóreo-arbustivo descontínuo. A composição florística dessas massas florestadas, permite diferenciar dois tipos fisionômicos-estruturais chaquenhos: o arbóreo arbustivo semi-decíduo, ou Bosque misto de *Aspidosperma quebracho-blanco* e *Prosopis flexuosa* e o arbóreo-arbustivo decíduo ou bosque de algarrobo (*P. flexuosa*). Na fisionomia arbórea-arbustiva semi-decídua, o estrato arbóreo está dominado pelo Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) e “Algarrobo dulce” (*Prosopis flexuosa*), e o estrato arbustivo por “Jarilla” (*Larrea divaricata* e *L. cuneifolia*). O arbóreo arbustivo semi-decíduo está constituído por um estrato arbóreo que ocupa aproximadamente 30% do solo e cuja altura é, em média de 5,5m. O bosque misto se distribui em uma ampla área oferecendo uma relação de continuidade com a planície

florestal dos Estados argentinos vizinhos (Morello, 1977). Nesta fisionomia (1.23), é notável observar que os exemplares de *Aspidosperma quebracho blanco* e *Prosopis flexuosa* não seguem uma mesma proporção no tipo de ocupação da área, encontrando-se com maior frequência o “Quebracho blanco” nas zonas de maior altura e a “Algarrobo dulce” nas zonas baixas de planície, segundo Dalmaso e Marquez, (1999) Kiesling (1994) e Kiesling (2003).



FIGURA 1.23 – Fotografia do bosque misto (Fisionomia Arbórea-arbustiva aclareirada) de Valle Fértil-Argentina.

O estrato arbóreo está formado por *A. quebracho-blanco* y *P. flexuosa*, conforme observado em primeiro plano na Figura 1.23. Diversas outras espécies compõem a paisagem, como: *Larrea divaricata*, *Geoffrea decorticans*, *Cassia aphylla*, *Cercidium praecox* entre os arbustos; *Zinia peruviana*, *Gomphrena tomentosa*, *Setaria pampeana*, *Setaria hunzikerii*, *Tricloris crinita* entre as herbáceas (Dalmaso e Marquez, 1999).

1.3.1.3. Fisionomia Arbórea Aberta

Está dominada em sua quase totalidade pelo estrato arbóreo, normalmente de altura elevada e rico em espécies, e quase sem indivíduos nos estratos arbustivo e herbáceo.

As suculentas, como o Facheiro (*Cereus squamosus*) e Mandacaru (*Cereus jamacaru*), podem alcançar 12m de altura (Lima, 1989), formando parte do estrato arbóreo da caatinga.

Ali, onde a ação erosiva da água e do vento tem adquirido grande importância, formam-se geralmente clareiras, onde aparece *Larrea cuneifolia*, *Bulnesia retama* e *Cassia aphylla*, cobrindo aproximadamente 15% do solo.

Finalmente, deve-se ressaltar que embora existam em todas as áreas manifestações de processos de erosão hídrica, estas alcançam maior magnitude no setor do bosque de algarroba, segundo Perpiñal et al. (1995) e Marquez et al. (1998), onde se conjugam fatores como maior pendente, textura fina dos solos e atividades econômicas intensivas (atividades extrativistas e superpastoreio) que favorecem os processos de desertificação. Do ponto de vista econômico, esta fisionomia tem grande importância por apresentar um estrato arbóreo formando bosques de excelente valor econômico, sendo a principal exploração a da madeira do “Algarrobo doce”, útil para cercados, móveis, lenha e carvão.

1.3.1.4. Fisionomia Arbórea

Esta é a forma florestal da caatinga (Lima, 1986), que no passado era no nordeste brasileiro, o tipo de caatinga com maior distribuição e atualmente é quase inexistente, somente encontrada em sua forma degradada. Agrupam esta fisionomia os tipos estruturais: Caatinga Arbórea contínua e Caatinga Arbórea descontínua.

O tipo fisionômico do Chaco arbóreo-arbustivo decíduo corresponde ao bosque puro de *Prosopis flexuosa*. Esta formação ocorre em direção sul, seguindo a disposição do lençol freático próximo dos 25m de profundidade, favorecendo o desenvolvimento de um algarrobal puro de *Prosopis flexuosa*, o qual tem sido intensamente explorado. As diferentes formas de uso destes bosques e as diferentes condições ecológicas da área estão provocando distintos tipos de recuperação. Em alguns setores, observa-se um processo de arbustização que tem originado “jarillales” densos (arbustais de *Larrea divaricata* e *L. cuneifolia*). Enquanto que, em outras áreas, este processo tem sido menos intenso, ficando grande porcentagem de solo exposto, após a perda das árvores (Pastran et al., 1992).

1.3.1.5. Fisionomia em Galeria

Compreende o Complexo arbóreo semi-decíduo, localizado geralmente em áreas baixas, várzeas dos rios adequadas para o desenvolvimento das árvores e vegetais perenes (Duque, 1980). É formado principalmente por árvores de grande porte e folhagem perene como o juazeiro (*Zizyphus juazeiro*) e quixabeira (*Bumelia sartorum*), encontrando-se bastante degradado, por um uso agropecuário intensivo e antigo, o que mantém a superfície do solo com baixa cobertura vegetal.

No chaco árido compreende também o chamado Complexo arbóreo semi-decíduo, localizado em áreas de córregos quase permanentes e de lençol freático a pouca profundidade ao alcance das raízes das árvores. O estrato arbóreo destes bosques pode alcançar até 8 m de altura, cobrindo mais do 30 % do solo. Formam este estrato árvores como “Algaroba doce” (*Prosopis flexuosa*), “Algaroba negra” (*Prosopis chilensis*), “Tala” (*Celtis tala*), “Mistol” (*Zizyphus mistol*) e “Retamo” (*Bulnesia retama*) de porte arboreo. Entre os arbustos, encontram-se “Jarillas” (*Larrea divaricata*, *L. cuneifolia*), Pichana (*Cassia aphylla*). O estrato herbáceo está composto por *Gomphrena martiana*, e gramíneas como *Setaria leiantha*, *Chloris virgata*, *Neobouteloa lophostachya* (Dalmaso e Marquez, 1999).

1.3.1.6. Fisionomia Agrícola

As áreas inclusas dentro da classe de “não caatinga” são aqui mencionadas como áreas de “Fisionomia Agrícola” e compreendem as áreas de roçados com culturas, roçados recentemente abandonados, campos roçados cercados para pastagem, etc. Com o objetivo de caracterizar as mudanças que se observa na imagem de detecção, foi feita uma descrição do tipo de uso atual ou anterior, da idade aproximada, das culturas desenvolvidas, das técnicas de cultivo e manejo. Quando abandonados ou em pousio, avalia-se o tempo do abandono do roçado. Tipo e o estado de manutenção ou de abandono do cercado e outros descritores particulares foram também considerados de extrema importância para análise dessas áreas. É importante destacar que esses espaços podem estar desprovidos da cobertura vegetal, no momento do imageamento, que

geralmente ocorrem na época seca em área pós-colheita como se observa na Figura 1.24.

A fisionomia agrícola pode estar ocupada por tipos estruturais simples e diversos como os de reconquista vegetal, áreas roçadas ou degradadas em que, uma vez abandonadas ou deixadas em pousio, ocorre a ocupação espontânea por espécies nativas. São espaços alterados, com formas geométricas regulares a retangulares, e contornos (florístico e estrutural), geralmente, retilíneos. Floristicamente em geral possuem alta dominância de uma ou poucas espécies e apresentam limites abruptos, em relação com a equitatividade de espécies da caatinga. Na Figura 1.24 observa-se em segundo plano a caatinga arbustiva e em primeiro plano palha seca de milho e o começo da ocupação das margens do roçado por *Canafístula* (*Cássia excelsa*).



FIGURA 1.24 – Espaço agrícola na época seca na região de Ouricuri.

Essas áreas podem estar ocupadas por um Complexo Arbustivo-Herbáceo ou Arbustivo denso de vegetação natural em regeneração, conservando em geral as formas geométricas e os limites abruptos. Estes complexos vegetacionais agrupam, assim, espaços de reconquista vegetal, apresentando nos roçados abandonados onde há grande dominância de herbáceas semi-lenhosas como *Malva lava-prato* (*Herissantia crispa*) e

lenhosas como Marmeleiro (*Croton sonderianus*) e Jurema preta (*Mimosa hostilis*), ambas pioneiras na ocupação destas áreas.

Na região estudada pode-se encontrar três tipos de lavouras: a roçada, a mecanizada e em covetas. A prática mais comum na área de Ouricuri é o roçado da caatinga. Este roçado que em geral se inicia com a queima sem destocamento, tem nos dois primeiros anos, cultivos intercalados de milho, capim buffel, feijão ou mandioca, sendo o ciclo de exploração em torno de dez anos. Este ciclo pode ser seguido do pousio com vegetação nativa, e há casos de forte degradação. A forma mecanizada ou semi-mecanizada é usada para plantações em terrenos mais planos, com solos mais leves, com menores quantidades de componentes litólicos. Nas semi-mecanizadas as lavouras são feitas com o uso de arado ou da grade de disco com tração animal. Esta é a prática freqüente na área de Ouricuri e é desenvolvida geralmente em propriedades de pequenas dimensões, em torno de 10 hectares.

Na fisionomia agrícola, encontram-se coberturas vegetais cuja dinâmica depende das características agronômicas das culturas, como as anuais de Feijão (*Phaseolus sp.*), Milho (*Zea maiz*), Algodão (*Grossypium sp.*) ou as culturas plurianuais como a Palma (*Opuntia ficus-indica*), mostrada na Figura 1.25. Capins plantados em covetas sobre solos litólicos ou em solos medianamente apropriados para lavouras são também encontrados na área (Faria, 1992).



FIGURA 1.25 - Cultura de palma (*Opuntia ficus-indica*) na caatinga de Ouricuri-PE.

Também são encontradas pastagens consorciadas em caatinga arbustiva, gramíneas forrageiras para a alimentação do gado, geralmente capim bufel (*Cenchrus ciliaris*), cultivado em solos leves e profundos, de porte baixo, formando touceiras, segundo Oliveira (1993), preferencialmente plantado em áreas de caatinga recém-destocadas, desmatadas e em covetas nas encostas pedregosas. É comum o capim elefante (*Panisetum purpureum*), pluri-anual de grande desenvolvimento, o qual, segundo Martins et al. (1994), não é cultivado em áreas de relevo acidentado, preferindo-se áreas de baixada não sujeitas à inundação. A cobertura vegetal de um roçado, também pode estar formada por espécies nativas, quando se trata de alqueive ou pousio. Na prática agrícola típica da área, quando um terreno novo é roçado, deixa-se o roçado mais antigo entregue às plantas espontâneas. As espécies pioneiras mais importantes nesta ocupação são o marmeleiro (*Croton sonderianus*), a Jurema preta (*Mimosa hostilis*) e a malva lava-prato (*Herissantia crispa*).

No chaco árido argentino a situação é muito semelhante; as fisionomias agrícolas podem ser encontradas na forma de cultivos temporário e permanente, ou ainda com formas de reconquista vegetal natural. Estas últimas são áreas degradadas e abandonadas, onde ocorre a ocupação espontânea por espécies da vegetação nativa. Esta

ocupação forma, em geral, um Complexo Arbustivo-Herbáceo, o qual permanece muito tempo com baixa cobertura. São características desta ocupação as espécies de Tusca (*Acacia caven*) e Pichana (*Cassia aphylla*) e, quando as condições são muito secas, a Jarilla (*Larrea cuneifolia*) e, em geral, o estrato herbáceo está composto por *Gomphrena martiana* como principal elemento.

Em relação à agricultura itinerante observada na Caatinga brasileira, na região do Chaco não existe. Em seu lugar, a adubação permite uma exploração contínua da parcela, até o abandono por eventual salinização, perda de solo, compactação ou erosão (Karling et al., 1994). As culturas que podem ser encontradas são em geral voltadas a agricultura de minifúndio e subsistência, com pequenas parcelas de milho, abóbora, ou plantas forrageiras como Alfafa (*Medicago sativa*). Também podem ser encontradas pequenas parcelas irrigadas artificialmente com árvores para madeira de baixo valor comercial, geralmente Álamo (*Populus sp.*).

1.3.1.7. Solo Nu

Estes são espaços desprovidos da cobertura vegetal, temporalmente ou durante o ano todo. Estes últimos são áreas que por degradação do solo, perda da fertilidade por compactação ou excesso de salinidade são abandonadas, e a recuperação leva muitos anos (FIGURA 1.26).



FIGURA 1.26 – Clareira em área de fisionomia predominantemente arbustiva, com superfície compactada e levemente salinizada, em Valle Fértil-Argentina.

Em outros casos o solo exposto ocorre somente na época seca, em áreas de culturas pouco produtivas ou roçados dedicados às práticas inverniais de confinamento do gado. Estas áreas possuem superfícies de tipos muito variáveis, desde os estruturalmente formados por material silteoso, argiloso e mesmo por componentes típicos de solos litólicos. Estes últimos quando ocorrem no semi-árido, segundo Paton (1978) e Guerra e Cunha (1996), são em sua maioria, produtos da erosão. Nas zonas baixas vizinhas à drenagem, a superfície é cultivável por possuir material fino e fértil. Nas zonas intermediárias, a situação pode ser variável dependendo do substrato, cuja erosão pode acumular, na superfície, seixos de quartzo que dificultam as lavouras agrícolas. Esta acumulação de seixos na superfície do solo pode cobri-lo totalmente, dificultando a ocupação vegetal.

1.3.1.8. Outras Fisionomias

Nesta categoria estão englobadas outras classes como as depressões fechadas, como a apresentada na Figura 1.27 e as de águas permanentes, de menor expressão em área. Nesta categoria estão incluídas as depressões salinas, que em áreas vizinhas dos “salitrales”, ocupam grandes extensões e possuem amplas transições de fisionomia arbustiva (Garcia et al. 1996).



FIGURA 1.27 – Depressão salina no leste da área de Valle Fértil, Argentina.

1.4. Materiais

O material utilizado está formado por imagens digitais, mapas temáticos, cartografia digitalizada e o “*software*” para gerenciamento da informação geográfica e para processamento digital das imagens.

1.4.1. Materiais Cartográficos e Imagens Orbitais.

1.4.1.1. Imagens

As imagens utilizadas foram coletadas pelo sistema Landsat, as mais antigas com o sensor TM e as mais atuais com ETM+ de Landsat 7. A seguir na Tabela 1.4, são apresentadas algumas características destes materiais digitais.

TABELA 1.4 – Imagens digitais utilizadas.

Área	Cena Path/Row	Data	Sensor	Bandas	Elevação solar
Ouricuri – PE (Brasil)	217 – 066	1984– 1110	TM	123457	59.8792
	217 – 066	1996– 1023	TM	123457	59.2351
	217 – 066	1999– 0625	ETM	23457	47.2490
	217 – 066	2001– 0910	ETM	123457	57.6075
	217 – 066	2002– 0225	ETM	123457	61.7564
Valle Fértil – San Juan (Argentina)	266 - 081	1987– 0906	TM	123457	57.2309
	266 - 081	2000– 1112	ETM	123457	59.7691

Destas imagens a que possuía a melhor qualidade visual foi selecionada para ser a base georreferenciada do banco de dados. A partir desta imagem, cujas características são mostradas na Tabela 1.5., todas as outras foram co-registradas com a exatidão necessária para a detecção de mudanças.

TABELA 1.5 - Imagem ETM 217 066 na data 10/09/2001, utilizada como base georreferenciada do sistema de detecção.

Nível de correção 4	Sistema de correção geométrica Projeção cartográfica = UTM Zona número = -24 Elipsóide = SAD69 Pixel = 30.00m
Ângulo Azimutal	65.8414°
Elevação solar	57.6075°
Ângulo Zenital	32.3925°

1.4.1.2. Base Cartográfica

Os seguintes materiais cartográficos foram utilizados como base georreferenciada para a incorporação de informação geográfica na montagem do banco de dados para a área brasileira:

- Carta de Parnamirim-PE (IBGE-MIR 1362) na escala de 1:100.000;
- Mapa do Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos (Folha Parnamirim SC-24-C-I- Zoneamento Agro-ecológico do Estado de Pernambuco, 1997) na escala 1:100.000.

Para a área Argentina foram empregadas :

- Cartas do IGM – Instituto Geográfico Militar – Escala 1:100.000, sector San Agustín;
- Mapa das Formações vegetais do Departamento Valle Fértil, de Dalmazo e Marquez (1999).

1.4.1.3. Suporte Temático

Como informação temática utilizada, contida em mapas e cartas foram digitalizadas e incorporadas ao banco de dados de informação georreferenciada, constam:

- Mapa de Uso de 1996 da Departamento de Valle Fértil, escala 1:100.000, Museo de Ciencias Naturales-UNSJ y Dir. de Recursos Naturales, Gobierno de San Juan (1986);

- Mapa dos Tipos Estruturais da Vegetação de Caatinga da área de Quixaba para o ano 1983, feita por Carvalho (1986) na escala 1:100.000;
- Carta Hidrogeológica de CRAS - Direção Regional de Água Subterrânea na escala de 1:100.000;
- Mapas da GUVAS (Grandes Unidades de Vegetação e Ambiente), para o ano 1993, na escala 1:100.000, Ortiz et al. (1993);
- Mapa do estado de situação da Planície Florestal do Departamento Valle Fértil para o ano 1997, na escala 1:100.000, Marquez et al. (1998);
- Mapa de isoetas da Província de San Juan, escala 1:500.000, Minetti (1980);
- Leituras dos postos pluviométricos da vizinhança da área de Icaçara dos anos 1984-2000. (SECTMA-PE. 1998).

1.4.2. Software

Foram utilizados o software ERDAS Imagine 8.4, para o processamento digital de imagens e programação no módulo Modeler em “Spatial Modeler Language” para correções radiométricas e realces de bandas. Outro software utilizado foi MATLAB 6.0 Release 12, para o desenvolvimento do software Sistema de rotação radiométrica de imagens – SIREI, onde foram implementadas as novas técnicas de detecção de mudanças. Também foi utilizado SPRING 4.0 - Sistema de Processamento de Imagens e Informações Georreferenciadas desenvolvido pelo INPE, para as atividades de geoprocessamento, construção e análise do banco de dados geocodificados.

1.5. Considerações Gerais

Uma vez apresentada a fundamentação teórica que abrange conhecimentos acerca das técnicas que vem sendo aplicadas no monitoramento de uso e cobertura da terra (sob o ponto de vista do sensoriamento remoto e da ecologia), além da descrição das áreas de estudo e os materiais que compõem todo o procedimento metodológico adotado, apresenta-se na finalização deste Capítulo um fluxograma metodológico que norteia essa pesquisa de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semi-árido. As etapas operacionais contidas nesse fluxograma estão devidamente descritas e fundamentadas nos capítulos subseqüentes.

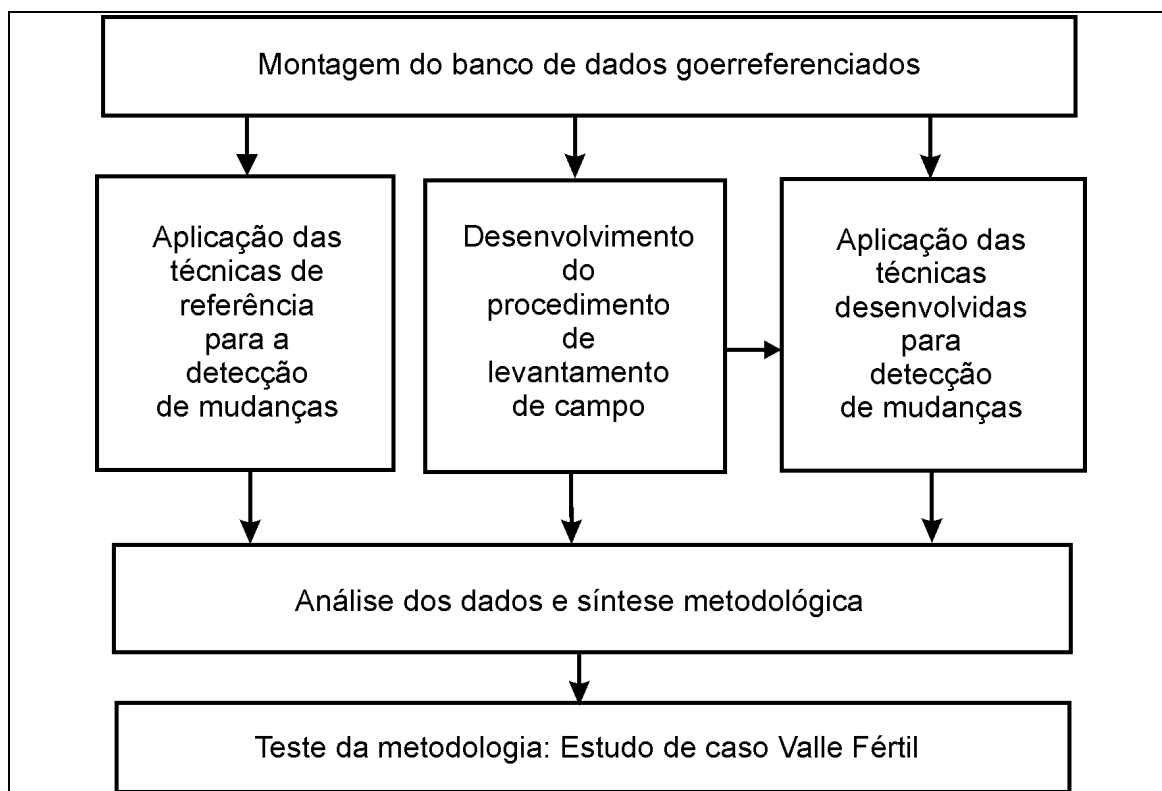


FIGURA 1.28 – Fluxograma metodológico geral da pesquisa

CAPÍTULO 2

MONTAGEM DO BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADOS

2.1. Montagem do Banco de Dados Georreferenciados

Nesta fase de estruturação metodológica foi montado um banco de dados geográficos, incorporando informações para o embasamento e desenvolvimento da pesquisa. Os detalhes do procedimento de montagem são apresentados na Figura 2.1, para ser detalhado subseqüentemente.

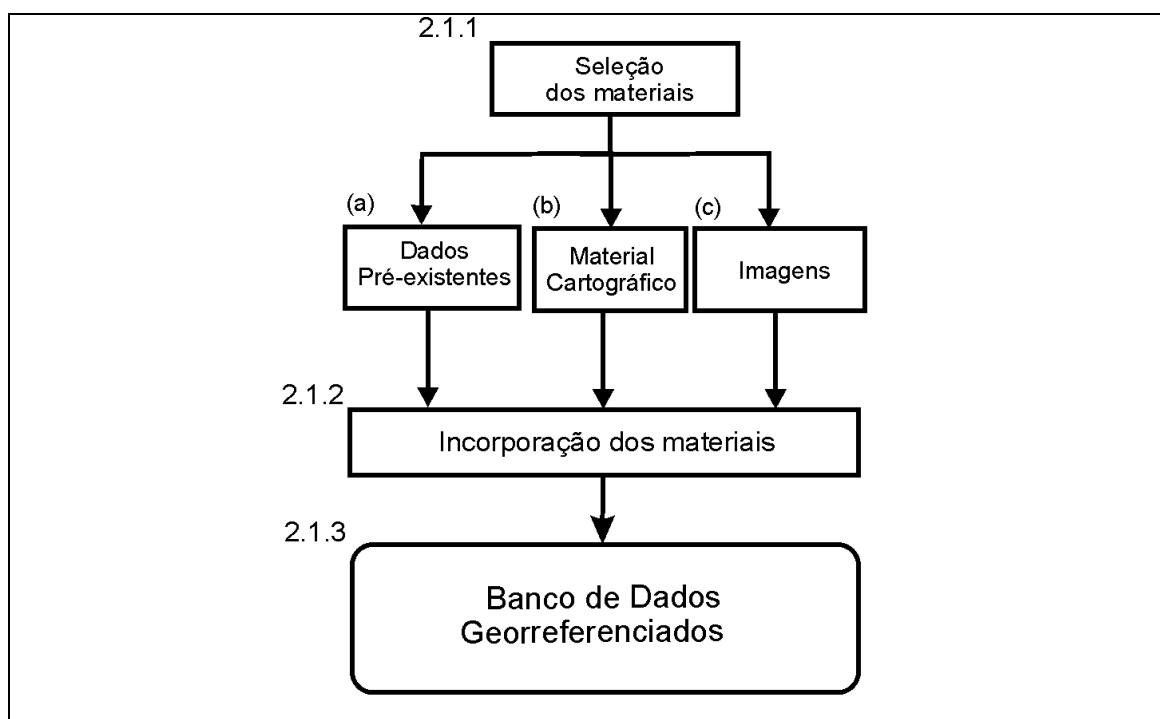


FIGURA 2.1 - Fluxograma da fase de estruturação

2.1.1. Seleção dos Materiais

A escolha dos materiais compreende (a) a seleção dos dados pré-existentes no banco de dados Ouricuri, (b) o material cartográfico e (c) as imagens, que fornecem informações de base, necessária para os subseqüentes procedimentos da pesquisa.

a) Dados Pré-existentes: A entrada de dados pré-existentes foi similar para cada uma das áreas selecionadas. A informação de cada área de estudo foi incorporada ao Banco

de dados num projeto próprio para cada área. Os projetos compartilham a mesma estrutura hierárquica para incorporar os materiais. Os dados para a área de Ouricuri, são provenientes do trabalho de Maldonado (1999), cujo levantamento de campo foi realizado em 1998. Estes pontos foram re-projetados ao sistema UTM Datum SAD69, e incorporados na categoria de Planos de informação (PI) ou “*layer*” numérico da data do levantamento. Todos os pontos amostrais dos levantamentos de campo foram incorporados em PI’s numéricos, dentro do projeto da área respectiva.

b) Material Cartográfico: O banco de dados foi montado na escala de 1:100.000, compatível com a cartografia disponível. O processo de incorporação da informação cartográfica foi feito através de um módulo específico de digitalização em mesa digitalizadora ou em tela e mediante re-projeção de cartas digitais disponíveis em outros sistemas. Este material foi incorporado no sistema como plano temático. Para cada um dos temas, foram definidos planos de informação, visando armazenar separadamente dados específicos. Adicionalmente, os pontos de GPS coletados, que foram também inseridos no SPRING/INPE através de um arquivo no formato ASCII, contendo os respectivos dados de latitude e longitude, constituindo desta forma, um novo plano de informação numérico. Tal Plano de informação foi utilizado como ferramenta auxiliar no processo de determinação da localização e análise da vizinhança das amostras e da precisão dos resultados cartográficos.

c) Imagens: As imagens foram registradas para o sistema de coordenadas UTM WS84 utilizando uma correção geométrica imagem-imagem. Este sistema de coordenadas foi adotado para diminuir a complexidade do registro das imagens. Dessa forma as imagens puderam ser registradas com polinômios de primeiro grau, com erro menor do que meio pixel, e interpolação do vizinho mais próximo. Assim, o valor original de cada pixel foi preservado para as operações entre bandas da detecção de mudanças.

2.1.2. Incorporação dos Materiais

Os materiais foram incorporados ao banco de dados a PI numéricos e temáticos, segundo o tipo de informação neles contidos. Nesta incorporação, particularmente para o caso das imagens orbitais, detalha-se, a seguir, um procedimento para as correções da informação radiométrica das imagens digitais em modo radiância e reflectância e suas

incorporações como PI numéricos, fornecendo assim os dados necessários às técnicas utilizadas nessa pesquisa.

As correções radiométricas foram feitas com duas finalidades. A primeira foi obter imagens em modo radiância para fornecer PIs necessários às técnicas de detecção de mudanças por rotação controlada ACP, RCEN e RCIA. A segunda foi obter imagens reflectância de qualidade para aplicação da técnica de diferença entre bandas. No primeiro passo foram convertidos os dados digitais das imagens em valores de radiância espectral (L_λ), onde ND é o número digital das imagens brutas. Foi utilizada a seguinte fórmula:

$$L_\lambda = \alpha_\lambda ND + \beta_\lambda \quad (2.1)$$

α_λ = coeficientes de calibração do sensor (ganho)

β_λ = coeficientes de calibração do sensor (offset)

Estes coeficientes foram fornecidos com os arquivos das imagens no caso das imagens TM, e no caso das ETM foram obtidos através da internet. Estes parâmetros são dependentes da data do imageamento e, no caso de ETM+, também da latitude da cena. Esta primeira calibração foi necessária para compatibilizar dados dos sensores TM e ETM+/Landsat. Em seguida, para obter as imagens reflectância foi feita uma conversão do modo radiância em reflectância exoatmosférica, com posterior correção atmosférica para obter-se as imagens no modo radiância, como se mostra nas Equações 1.2. e 1.3.

$$\rho_\lambda^* = (L_\lambda * \pi d^2) / (E_\lambda \cos \theta_s) \quad (2.2)$$

Onde : L_λ = radiância

E_λ = irradiância solar na banda espectral λ

$\cos \theta_s$ = coseno do ângulo zenital solar

d = distância Terra-Sol

$$\rho_\lambda = (\rho_\lambda^* - a) / e_\lambda \quad (2.3)$$

Onde : ρ_λ^* = reflectância exoatmosférica

a = reflectância atmosférica lambertiana

e_λ = transmitância atmosférica

ρ_λ = reflectância ao nível do terreno

2.1.3. Banco de Dados Georreferenciados

O banco de dados georreferenciados foi estruturado com base ao modelo conceitual que contempla apenas variáveis espaciais da classe geocampo ou espacialmente contínuas. Este foi estruturado em projetos individuais para cada área de estudo, com seus respectivos sistemas de coordenadas geográficas. Cada projeto foi organizado segundo uma ordem hierárquica, na qual as datas individuais das imagens e o intervalo multitemporal (da imagem detecção) compõem a categoria básica (primeira subdivisão) na compartimentação do banco de dados. Por exemplo, os produtos do cruzamento da informação do tempo 1 com tempo 2 formam o Intervalo 1, como se apresenta esquematicamente na Figura 2.2. A medida que aumenta o número dos intervalos de monitoramento esse número de sub-divisões também aumenta.

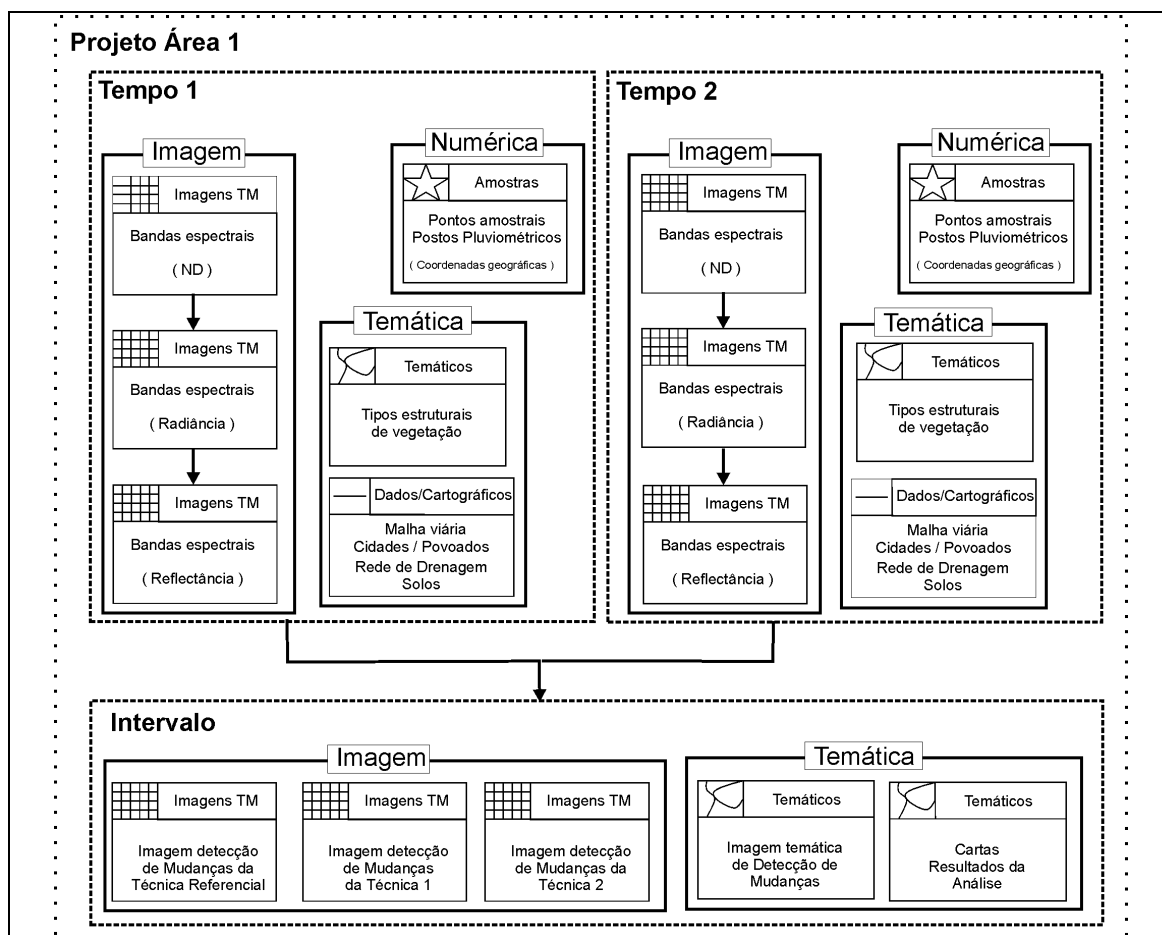


FIGURA 2.2 – Estruturação do projeto do banco de dados georreferenciados.

A primeira subdivisão está de acordo com a categoria dos dados contidos nos diferentes planos de informação (PI). Isso baseia-se nas categorias de representação típica de dados a serem trabalhados no SPRING/INPE, sendo estas categorias indicadas como polígono, modelo numérico e imagem. A categoria polígono reuniu os planos de informação cujos dados foram extraídos das cartas (solos, tipos estruturais de vegetação, máscara de nuvens, degradação e recuperação, etc.). Nos PI da categoria imagem são incorporados os dados codificados em 8 bits das cenas originais Landsat, e imagens detecção de mudanças resultados do software SIREI - Sistema de Rotação Radiométrica de Imagens (Maldonado, no prelo). Este sistema também fornece as imagens temáticas para a obtenção dos mapas das mudanças.

Os processamentos digitais que embasam os desenvolvimentos das novas técnicas digitais não foram executados no mesmo sistema do banco de dados, no caso o SPRING 4.0. Esses processamentos utilizaram de forma intensiva algumas operações algébricas entre imagens, que devem ser aplicadas sobre dados de imagens contidas em formato contínuo (número real) segundo Gomes e Velho (2002), no programa SIREI do ambiente Matlab.

2.2. Resultados

As imagens incorporadas ao banco de dados georreferenciados apresentaram-se sem falhas nem problemas radiométricos. Estas foram analisadas em primeiro lugar em relação a falta de continuidade dos valores sensoriados. Esta continuidade foi analisada visualmente nos histogramas das imagens nível digital-ND. Quando aparecem descontinuidades, estas podem ter sido causadas por falhas nas correções das imagens feitas pelo fornecedor. Nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 mostram-se os histogramas das bandas TM3, TM4 e TM5, observando-se que todas as imagens incorporadas ao banco de dados não apresentaram falhas.

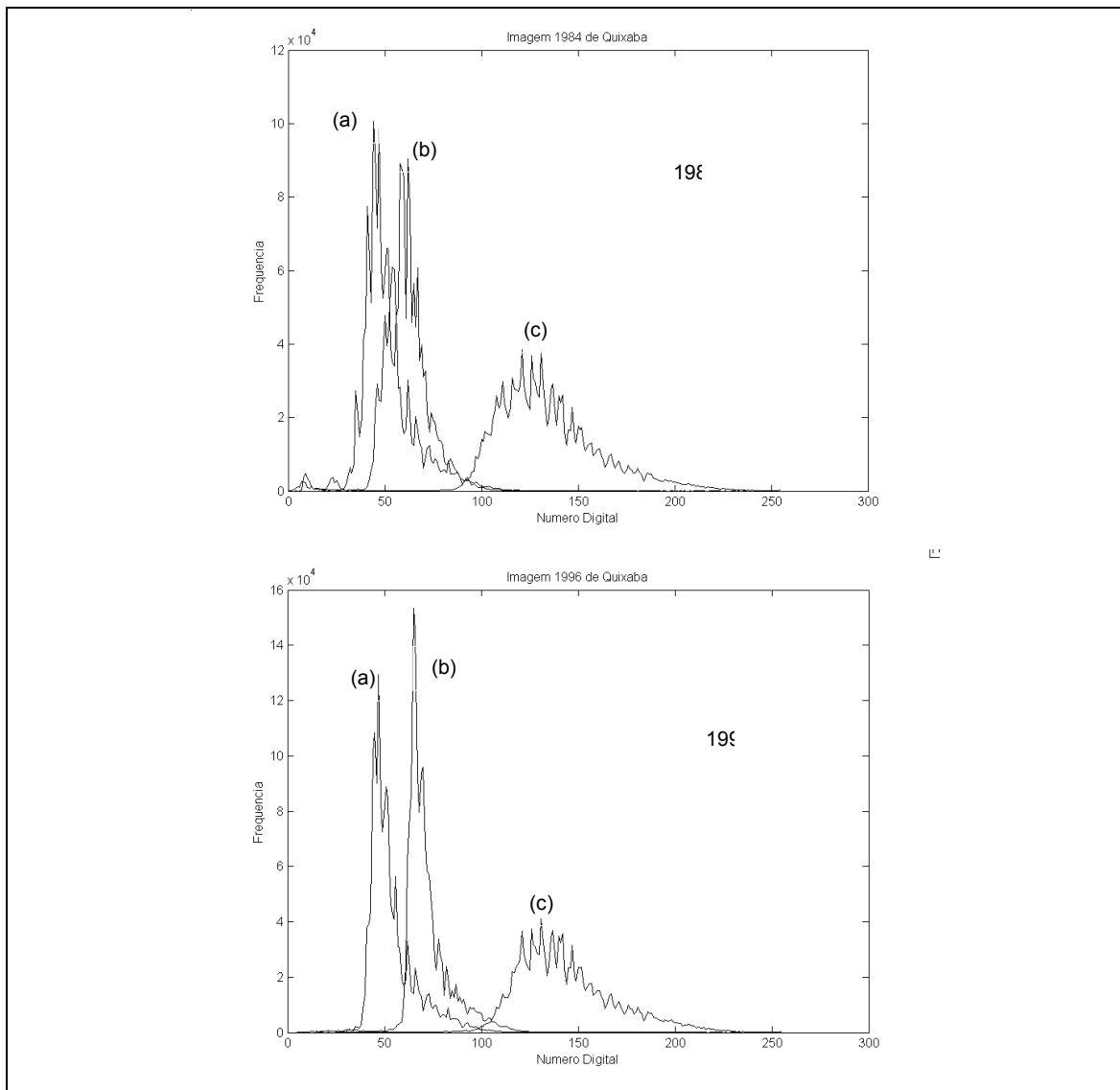


FIGURA 2.3 – Histogramas dos ND das imagens de órbita 217/066 de Ouricuri. (a) TM3; (b) TM4 (c)TM5.

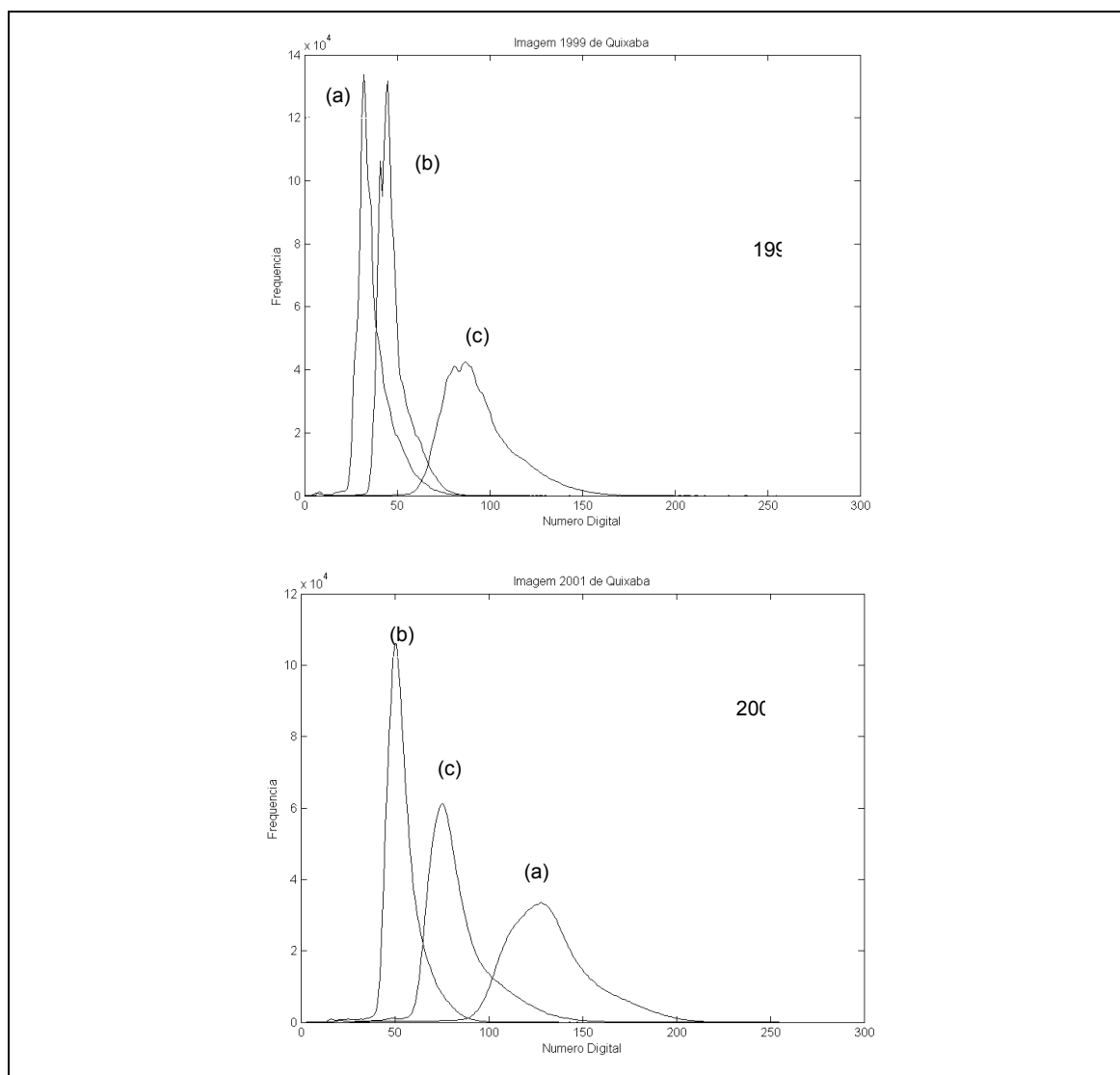


FIGURA 2.4 – Histogramas dos ND das imagens de órbita 217/066 de Ouricuri. Note-se que as duas imagens ETM possuem curvas mais suaves que as duas TM da Figura anterior. (a) TM3; (b) TM4 (c)TM5.

A condição radiométrica das imagens pode ser avaliada em relação a posição das curvas das bandas do vermelho e infravermelho (FIGURA 2.3). No último gráfico, correspondente a imagem 2001, pode-se observar que a Banda TM3 possui uma média maior de níveis de cinza do que as Bandas TM4 e TM5, contrariamente ao que ocorre nas outras cenas. O formato da distribuição de frequência dos níveis de cinza na TM3 está mais expandido (menor contraste), na cena 2001, comparado às demais. Isso pode

indicar que a cena 2001 sofreu maior influência atmosférica que as outras, sugerindo um efeito aditivo e outro multiplicativo atuando simultaneamente (Richards, 1993).

No caso das imagens de Valle Fértil os histogramas de níveis de cinza podem ser observados na Figura 2.5.

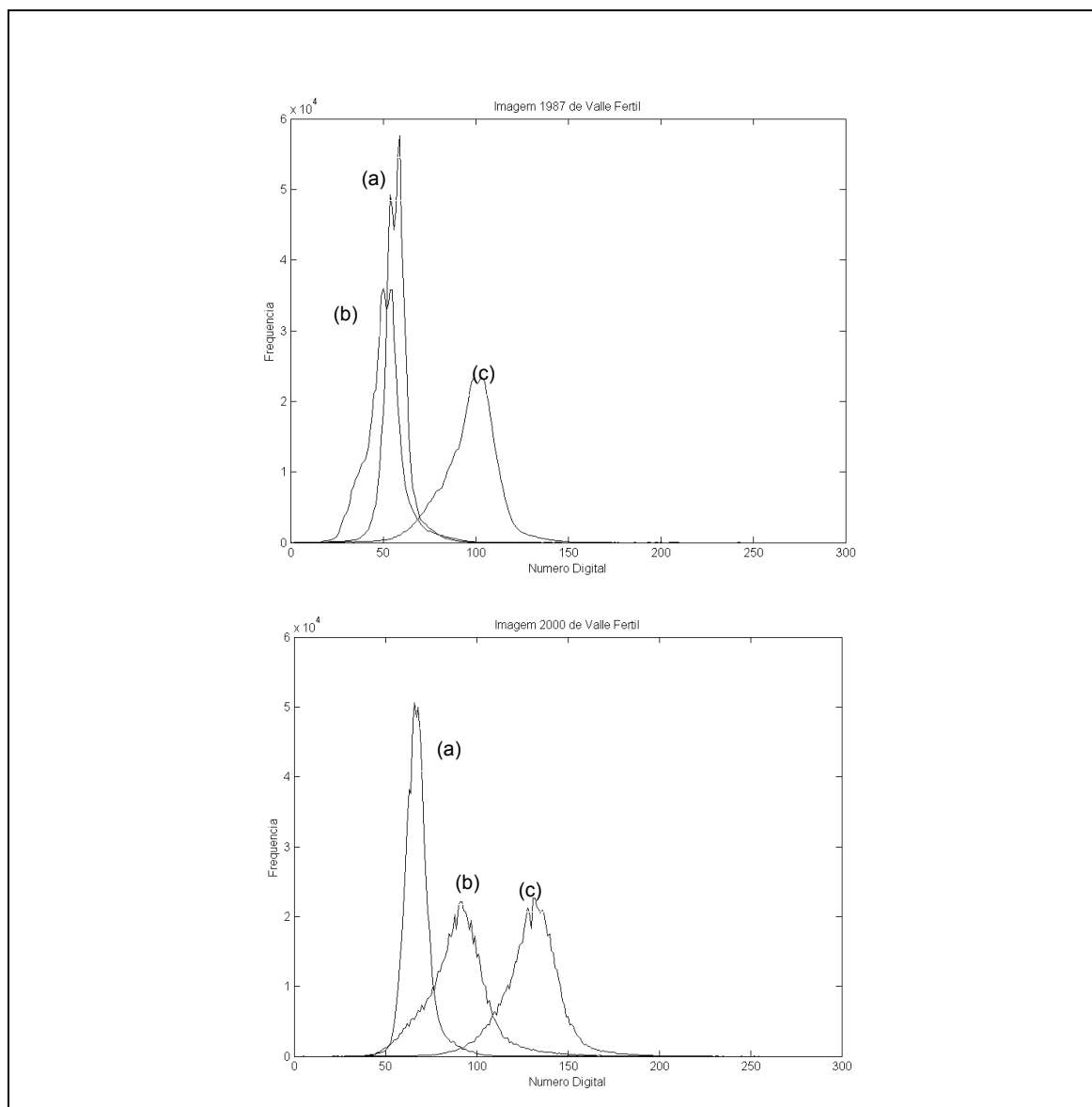


FIGURA 2.5 – Histogramas dos NC das imagens 266/081 de Valle Fértil. (a) TM3; (b) TM4 (c)TM5.

Após verificar que a qualidade das imagens estava apropriada para a pesquisa, as imagens de Ouricuri foram calibradas e foi extraído o valor aditivo da atmosfera. A

correção atmosférica feita com a técnica de pixel escuro apresentou algumas dificuldades, cujos valores aditivos por banda podem ser observados na Tabela 2.1, para as diversas cenas empregadas.

TABELA 2.1 - Documentação sobre as cenas.

Cena 217 066 Data	Valor aditivo Banda espectral						Localização do Pixel escuro
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	
22/11/1984	55	27	22	12	4	0	Represa Parnamirim
25/06/1996	47	20	17	7	3	0	Represa de Jacaré
26/06/1999	39	19	16	7	9	6	Represa de Quixaba
10/09/2001	71	52	44	14	17	13	Represa de Jacaré

Os pixels mais escuros e inclusos num grupo homogêneo suficientemente grande para ser utilizado foram encontrados dentro dos corpos de água, identificados na região como açudes (FIGURA 2.6).



FIGURA 2.6 - Açude do qual foi extraído um valor de pixel escuro. Embora este seja de mais de 200m de comprimento freqüentemente seca, dificultando a correção atmosférica simples nas terras secas.

A principal dificuldade para este tipo de correção atmosférica está relacionada com a ocorrência de secas prolongadas, que ocasiona diminuição da lâmina d'água do açude, o que em algumas imagens pode diminuir e até eliminar estas referências terrestres. Após obter as imagens radiância e reflectância os pré-processamentos foram documentados e o banco de dados georreferenciados foi consolidado na estrutura da Figura 2.2, e os planos de informação disponibilizados para as etapas subsequentes da pesquisa.

2.3. Conclusões e Recomendações

A montagem do banco de dados permitiu disponibilizar informação de distinta natureza, favorecendo ulteriores processos de extração integrada, além de tornar possível a análise da qualidade radiométrica (imagens codificadas) e geométrica das imagens. Essa análise pode ser feita através de observações sobre a forma contínua dos histogramas e da correspondência com outro tipo de informação contida na base. As imagens que sofreram distorções nos pré-processamentos aparecem com histogramas descontínuos, sendo este um bom critério para selecionar os dados para a montagem de uma base confiável de dados.

As correções atmosféricas, quando possível, devem ser feitas com modelos de correção simples, como o apresentado em Hall et al. (1999). Isto porque, embora exista na cena elementos apropriados para extrair um pixels escuros, o modelo de Hall é mais adequado para corrigir os efeitos da poeira atmosférica segundo Hall et al. (1999). Para tal, utilizando operações algébricas que somente podem ser aplicadas sobre dados contínuos em PIs numéricos, obrigando a decodificação das imagens, aplicação do modelo de correção e posteriormente, uma codificação (Gomes e Velho, 2002).

CAPÍTULO 3

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REFÊRENCIA PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS

3.1. Introdução

A importância desta fase metodológica foi estabelecer uma base comparativa para testar o desempenho das novas técnicas de detecção de mudanças desenvolvidas neste trabalho, a Rotação controlada por eixo de não mudança (RCEN) e a Rotação controlada por índice de acurácia (RCIA). Estas foram aplicadas de forma comparativa com duas outras técnicas atualmente em uso, que serviram como referência para avaliação dos resultados. As técnicas escolhidas foram a Diferença entre Bandas e a Análise por Componentes Principais (ACP). A primeira é uma técnica que utiliza imagens reflectância e a segunda, imagens radiância. Estas técnicas serviram de referenciais como exemplo de simplicidade operacional e de bons resultados. A ACP já foi testada com sucesso nesta mesma área do semi-árido por Maldonado (1999). Parte do processo foi comum às duas técnicas; porém, a abordagem que emprega a diferença entre bandas exige um pré-processamento maior do que a ACP. A primeira necessita de uma correção atmosférica precisa, pois sem adequado nível de correção, em alguns casos, pode gerar resultados inaceitáveis (Macleod e Congalton 1998). Desta maneira, os resultados obtidos foram referenciais da precisão factível utilizando técnicas simples sem e com correção atmosférica.

3.2. Procedimento Metodológico da Aplicação das Técnicas de Referência para Detecção de Mudanças

Neste procedimento metodológico foi aplicada a ACP e a simples diferença entre bandas. A primeira utiliza planos de informação no modo radiância de imagens multitemporais na banda TM3. Esta técnica, como é de conhecimento geral, utiliza os mesmos algoritmos das rotações radiométricas e, como já foi salientada na fundamentação teórica, esta técnica poderia ser chamada de rotação controlada por

matriz de covariância (RCMC). O desempenho desta técnica pode ser analisado comparativamente com aqueles da aplicabilidade das técnicas RCEN e RCIA. Porém, a performance da técnica diferença entre bandas somente será uma referência de desempenho comparável através do índice de exatidão. Esta técnica utiliza planos de informação no modo reflectância de imagens multitemporais na banda TM3 (FIGURA 3.1).

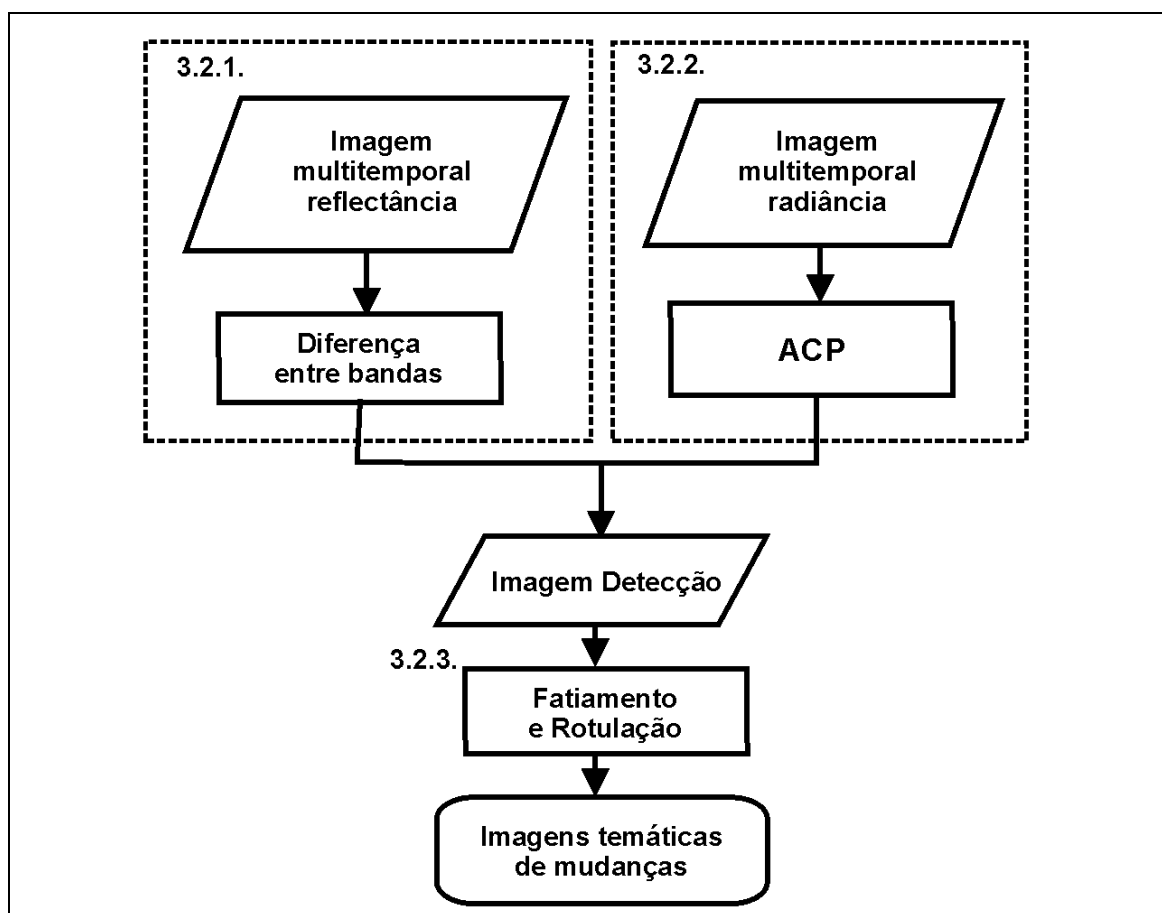


FIGURA 3.1 - Aplicação das técnicas de referência para detecção de mudanças.

Pode-se observar na Figura 3.1 que a etapa de fatiamento e rotulação foi similar para as duas técnicas de detecção de mudanças. Foi realizado um fatiamento paramétrico, com os parâmetros extraídos de uma imagem total, sem cobertura de nuvens. Este tipo de fatiamento e rotulação é um procedimento padrão já citado na bibliografia científica, como apresentado por Robinove et al. (1981), Jiaju (1988) e Singh (1989).

3.2.1. Técnica de Detecção por Diferença entre Bandas

A diferença entre bandas é uma técnica simples disponível em todos os programas de processamento de imagens. Embora simples, para sua aplicação é necessário que as bandas possuam atributos comparáveis, o que se consegue mediante pré-processamentos para obter as imagens em modo reflectância.

Essas imagens por sua vez permitem que as mudanças possam ser estimadas através da simples diferença entre pixels de uma e de outra data. A imagem obtida apresenta valores com a mesma grandeza radiométrica das imagens fonte, neste caso reflectância [adimensional] ou Δ *reflectância*. Valores de pixels negativos na imagem detecção significam pixels de maior reflectância na primeira data que na segunda data. Valores zero ou próximos de zero indicam não haver mudança na dinâmica das cenas investigadas.

3.2.2. Técnica de Detecção através da Análise por Componentes Principais – ACP

Esta técnica utiliza dois planos de informação (PIs) de imagens em modo radiância [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$], um para cada data. Estes PIs pertencem à mesma faixa espectral, no caso correspondente à TM3. A transformação da ACP produz uma rotação dos eixos radiométricos das imagens, baseada nos parâmetros dos algoritmos de rotação extraídos da matriz de covariância. Os resultados desta operação fornecem duas componentes em modo “transformada da radiancia” ou *Tradiância* [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$]. A primeira componente não tem interesse para a detecção de mudanças, e a segunda componente representa as mudanças radiométricas de uma data para outra. Os resultados desta técnica podem ser obtidos facilmente em qualquer “software” de processamento de imagens. Esta pode ser utilizada calculando a matriz de covariância da imagem total ou de uma porção da imagem. Esta última é chamada de ACP seletiva e permite um pouco de interatividade com o conhecimento do usuário.

3.2.3. Fatiamento e Rotulação da Diferença e da ACP

Este processo foi aplicado para transformar a imagem detecção de mudanças em modo contínuo numa imagem temática de cinco classes. Para isso foram definidas

arbitrariamente a posição de quatro limiares, segundo apresentado em Maldonado et al. (2002). O fatiamento e rotulação foi aplicado utilizando o mesmo algoritmo para as duas técnicas, calculando a posição dos limiares em base a parâmetros estatísticos da imagem total, como foi aplicado em Byrne (1980), Stow et al (1990), Babayev (1991), Bruzone e Serpico (1997) e Maldonado (1999). Tal fatiamento foi baseado na média da distribuição normal tomada como centro segundo os parâmetros do desvio padrão da imagem detecção, como mostrado na Figura 3.2.

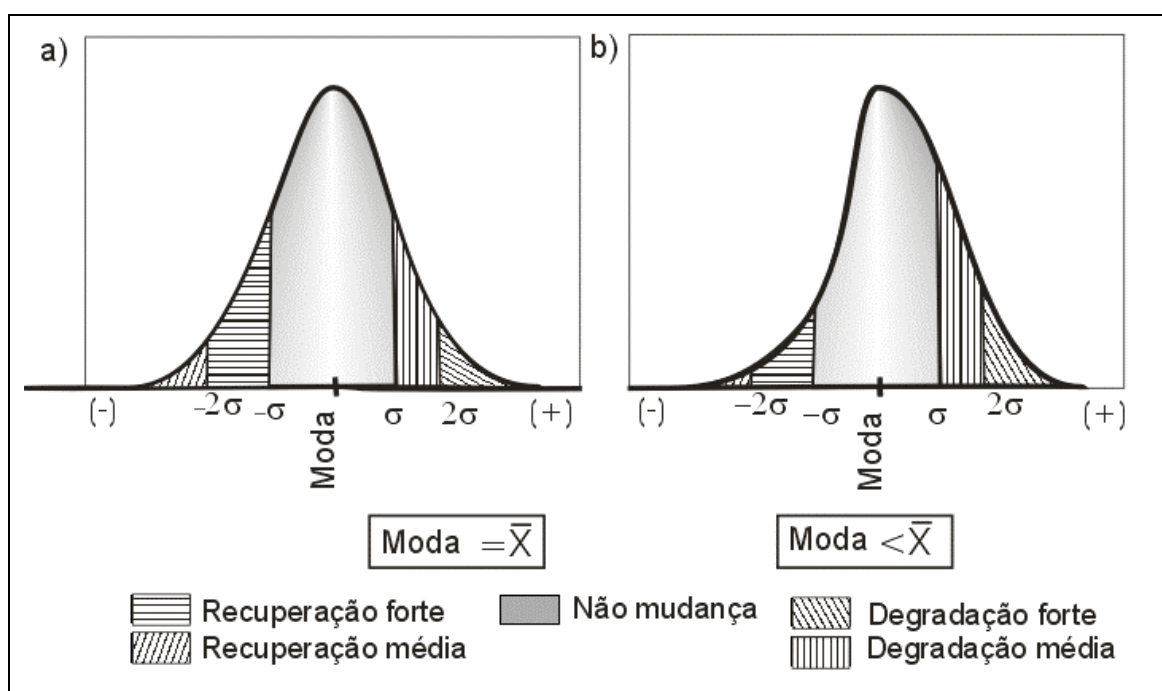


FIGURA 3.2 – Histogramas e fatiamento da imagem detecção; a) simétrica b) assimétrica de período de detecção curto, geralmente no semi-árido menor a 5 anos.

O resultado esperado da aplicação da técnica de simples diferença entre bandas é uma imagem detecção na qual os pixels que não mudaram possuem valores numéricos iguais ou próximos a zero. Os pixels que, neste caso da banda do vermelho, ganharam cobertura vegetal possuem valores negativos e os que perderam, valores positivos. Este suposto teórico raramente ocorre na prática, em razão da dificuldade de aplicar corretamente as correções atmosféricas para compatibilizar os dados entre datas.

Quando o pré-processamento é aplicado corretamente, as imagens tornam-se compatíveis, de forma que a imagem resultante tenha uma distribuição de frequência cujo centro do histograma seja coincidente com o zero.

Assim, sendo X a média, a posição dos limiares fica definida por:

$$X+\sigma = \text{posição do 1º limiar de degradação} \quad (3.1)$$

$$X+2\sigma = \text{posição do 2º limiar de degradação} \quad (3.2)$$

$$X-\sigma = \text{posição do 1º limiar de recuperação} \quad (3.3)$$

$$X-2\sigma = \text{posição do 2º limiar de recuperação} \quad (3.4)$$

Estes limiares permitem a rotulação das imagens em 5 classes: duas de degradação, uma de não mudança, e duas de recuperação. O valor dos pixels a serem rotulados como “Não mudança”, tiveram valores menores do que $X+\sigma$ e maiores do que $X-\sigma$. A classe “Recuperação média” apresenta valores entre $X-\sigma$ até $X-2\sigma$. A classe “Recuperação forte” apresenta valores menores que $X-2\sigma$. A classe “Degradação média” é definida com valores entre $X+\sigma$ até $X+2\sigma$. E a classe “Degradação forte” apresenta os valores maiores que $X+2\sigma$. Nota-se que esta rotulação pode ser definida independente do levantamento de campo, embora a precisão dos resultados será calculada a partir da informação de campo. Isto porque a aplicação destas técnicas somente tem o objetivo de ser referência para a análise dos resultados das técnicas em desenvolvimento nesta tese.

Numa primeira tentativa de aplicação, os resultados foram inaceitáveis e inúteis para os fins da análise comparativa desta tese. Porém, empiricamente pode-se considerar que numa imagem detecção de áreas que mudam pouco, como no semi-árido em curtos períodos de tempo, a moda entre pixels seja a de pertencer à classe de não mudança. Esta hipótese foi apoiada pelas observações de Eastman e Fulk (1993) e Elvidge et al. (1995) e confirmada pela afirmação de Chaves e MacKinon (1994): “Usualmente, em ambientes áridos e semi-áridos, o número de pixels cujo valor muda significativamente é estatisticamente pequeno, o que não modifica a dinâmica geral e a forma característica da distribuição da imagem”.

Assim, com base nas evidências empíricas destes autores, foi adotado para centro de posicionamento dos limiares a moda máxima da imagem detecção. Neste trabalho o

fatiamento está relacionado com uma modificação interativa. Esta interatividade, no presente trabalho não foi utilizada e as posições dos limiares foram definidas segundo as Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 modificadas para deslocar o centro (X) até a posição da moda da distribuição.

3.3. Resultados da Aplicação das Técnicas de Referência

As técnicas foram aplicadas de forma simples no software Matlab 6.0 R12. A diferença simples foi tratada simplesmente como uma operação algébrica entre arranjos numéricos em número real (dupla precisão ou número de ponto flutuante). A rotulação também foi feita neste *software* em forma simples, e se limitou à aplicação de operações relacionais para discretizar o espaço contínuo das imagens detecção transformando-as em imagens temáticas (mapas). Neste contexto, as cartas de mudanças da diferença entre bandas mostraram-se mais independentes das proporções esperadas entre classes temáticas da cena.

3.3.1. Resultados da Diferença entre Bandas

A diferença entre bandas funcionou adequadamente nos três intervalos de tempo avaliados, não apresentando nenhuma inconsistência empírica, quando analisada no contexto do ambiente avaliado durante o trabalho de campo. Isto porque o algoritmo de cálculo não inclui nenhum termo que introduz alguma restrição analiticamente relativa às proporções entre degradação e recuperação. A restrição analítica foi introduzida com base ao conhecimento empírico, adotando a moda máxima da imagem detecção para centrar o fatiamento. A moda, algebricamente, não está influenciada pela forma da distribuição de frequência da imagem detecção, não sendo portanto afetada pela relação entre degradação e recuperação. Contrariamente, a média que poderia ser tomada como centro está influenciada pela totalidade da distribuição.

Embora nesta instância metodológica não seja possível apresentar um índice de precisão baseado no levantamento de campo, pode-se dizer que visualmente os resultados foram satisfatórios. Esta análise visual baseia se na detecção de algumas feições de mudanças que são frequentes no semi-árido. A principal destas é o contraste de cercados, ou quando uma linha reta (cerca) separa duas áreas de mudanças média, geralmente

produto da ação do manejo do gado. Outra feição freqüente é a de não mudança em áreas de vegetação natural com alta porcentagem de solo exposto.

A técnica detectou a degradação delineando o traçado das novas estradas e obras hidráulicas na superfície do terreno. Deste modo, indicando numa primeira apreciação, a técnica da diferença simples teve bom desempenho no período longo entre as imagens 1984/2001. Nesta, aparecem no centro do mapa das mudanças (FIGURA 3.3a), o alinhamento da classe de degradação (em amarelo e vermelho) pela obra da adutora de água e o contraste do cercado de recuperação (em azul) no centro-leste da área, produzido pela introdução de capim bufel (*Cenchrus ciliaris*) em meio ao arbustal, recuperando a cobertura vegetal do solo. Na Figura 3.3b pode-se observar o histograma de freqüências para o cálculo da moda. Neste caso o histograma foi aproximadamente simétrico, com a moda (centro do fatiamento) se encontrando muito próxima à média, de forma que as proporções entre classes foram aproximadamente simétricas (FIGURA 3.3.c). Sendo individualmente 3% para cada classe de mudança forte (recuperação, em verde e outra de degradação, em vermelho), enquanto para as classes de recuperação média e degradação média os valores encontrados foram de 7 e 8% respectivamente.

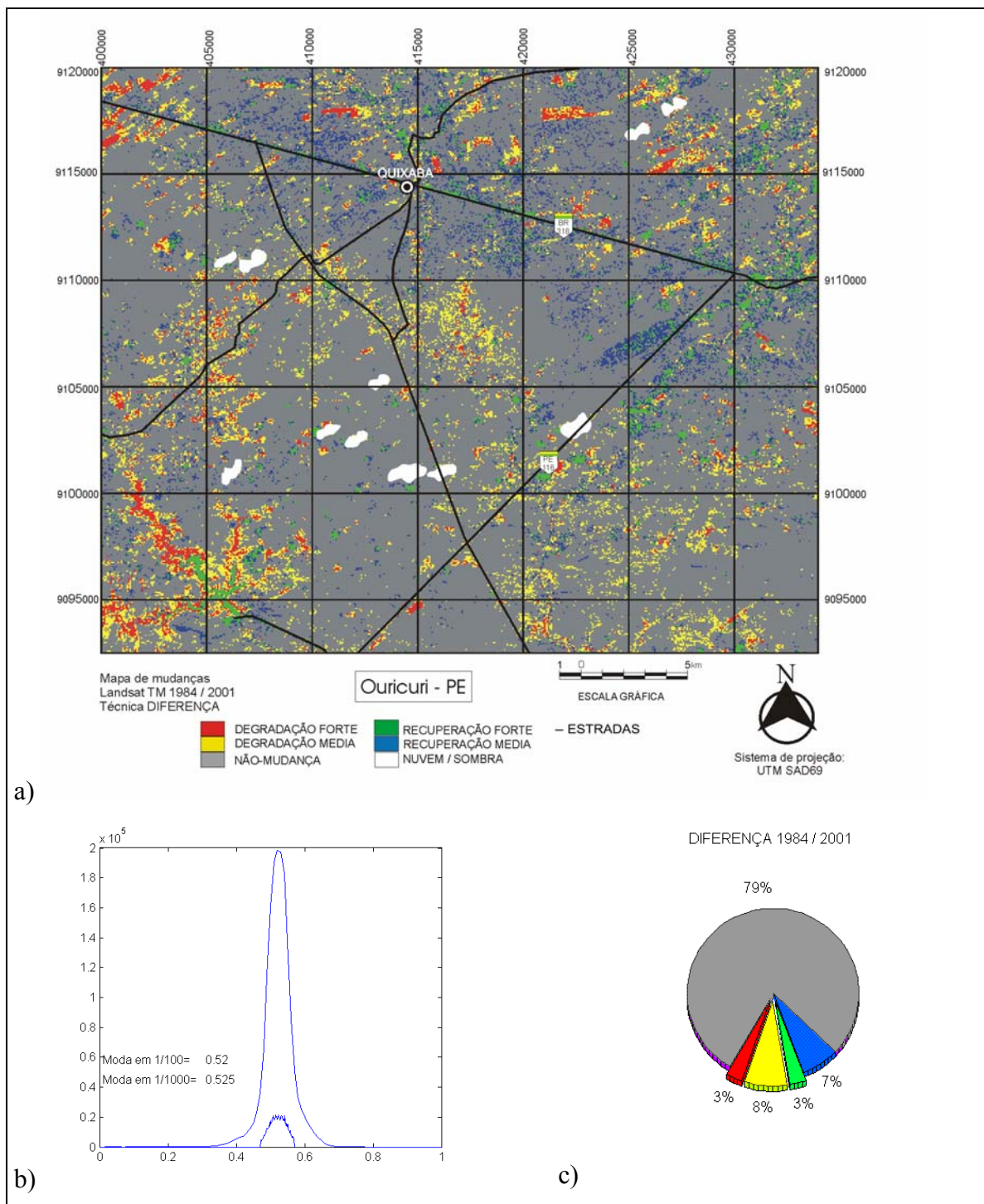


FIGURA 3.3. – Detecção por diferença simples 1984 até 2001. (a) Mapa de mudanças; (b) histograma da imagem detecção; e (c) Diagrama de proporções.

Na Figura 3.4a é mostrado o mapa de mudanças obtido pela simples diferença entre bandas 1996-2001. Neste caso a moda também foi adotada como centro de fatiamento do histograma de freqüências (FIGURA 3.4b). Na Figura 3.4c observa-se que as proporções entre classes também são aproximadamente simétricas.

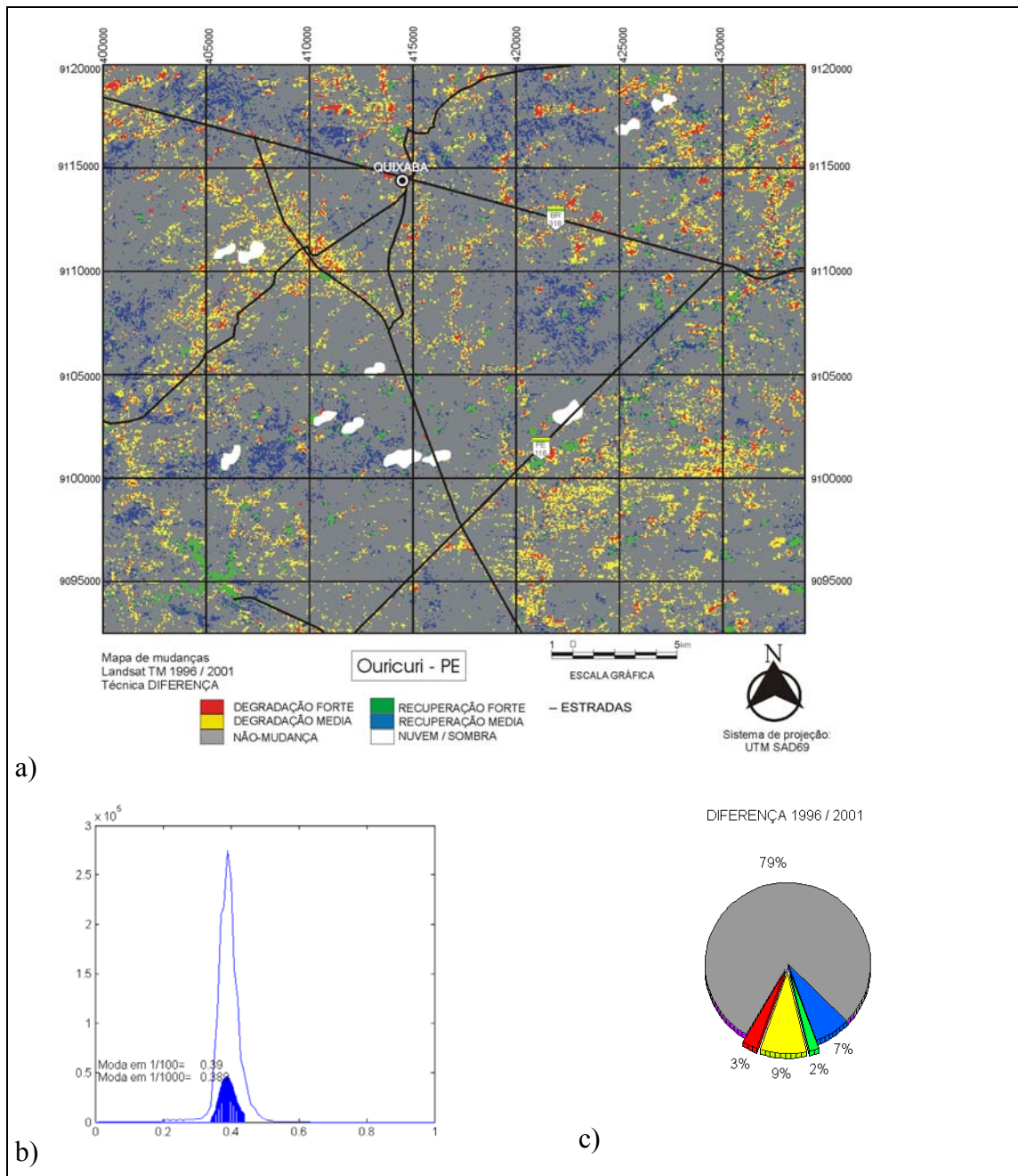


FIGURA 3.4. – Imagem detecção por diferença simples de 1996 até 2001, e a moda máxima de não mudança da imagem detecção.

Na Figura 3.5a é mostrado o mapa de mudanças obtido pela simples diferença entre bandas para um período curto de análise multitemporal 1999 e 2001.

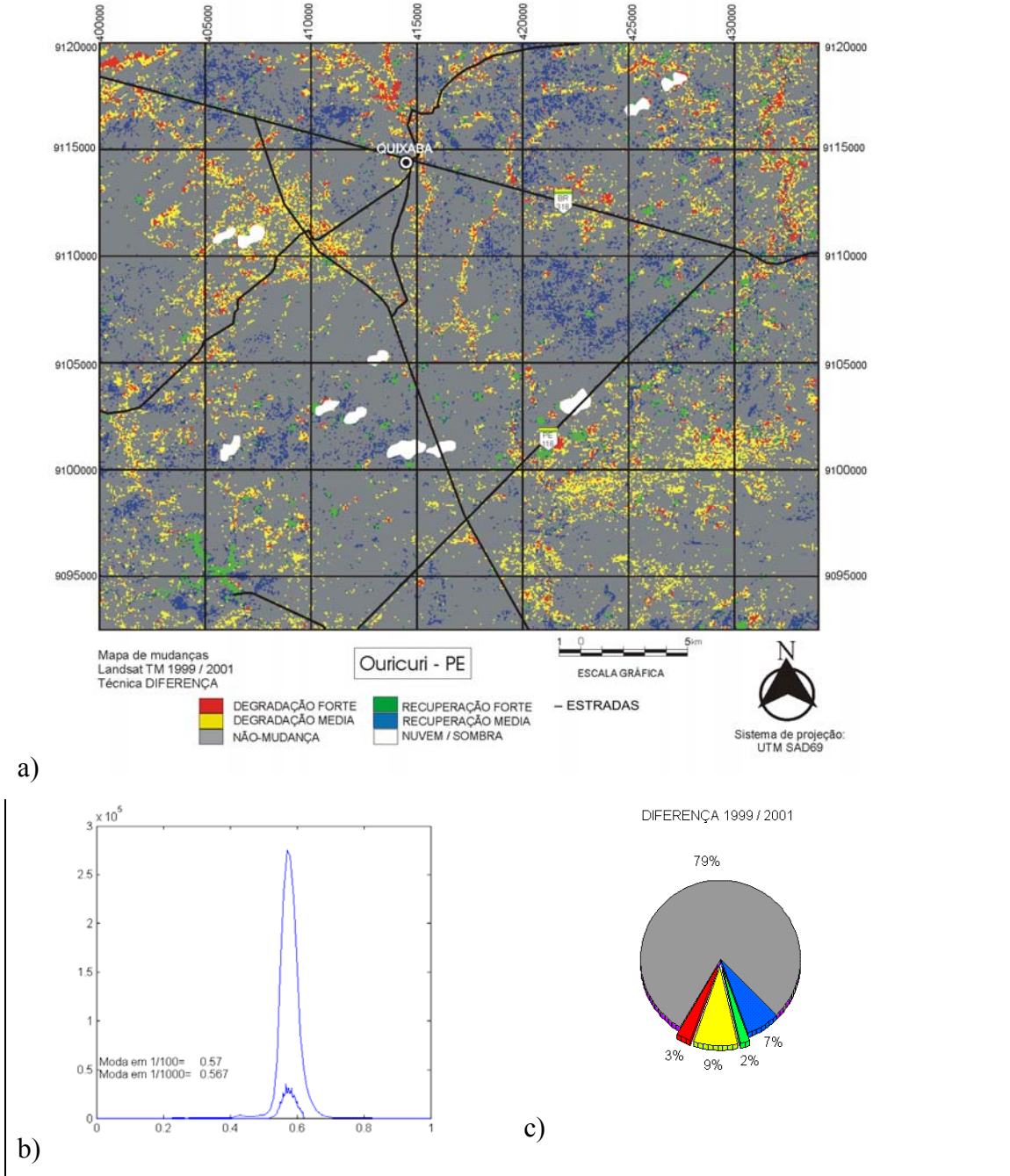


FIGURA 3.5. - Detecção por diferença simples de 1999 até 2001. a) Carta das mudanças; b) histograma da imagem detecção e moda máxima de não mudança; c) proporção de classes do mapa de detecção de mudanças.

Por causa da simetria do fatiamento estatístico e da curva do histograma (FIGURA 3.5b), também se observa uma relativa simetria entre as classes de mudanças (FIGURA 3.5c). A distribuição de freqüências da imagem detecção foi simétrica pelo que o fatiamento simétrico provavelmente não seja apropriado para esta técnica. Sobretudo quando o intervalo de tempo entre imagens é muito pequeno (2 anos) e são pouco freqüentes as classes de recuperação da caatinga.

3.3.2. Resultados da ACP

A análise por componentes principais funcionou bem na detecção para o intervalo de tempo maior entre as imagens 1984 até 2001. Isto pode-se observar nos autovetores próximos a 0.707 (seno e coseno de 45°) (Tabela 3.1). Este valor significa que a rotação está próxima a 45°, ou seja, próximo à solução oferecida pela diferença entre bandas.

TABELA 3.1- Parâmetros da análise por componentes principais para detecção de mudanças.

Autovetores		Autovalores
1984 - 2001		1984 - 2001
0.59674	-0.80243	294.63
0.80243	0.59674	98.842
1996 - 2001		1996 - 2001
0.36034	-0.93282	253.84
0.93282	0.36034	30.992
1999 - 2001		1999 - 2001
0.43984	-0.89808	271.46
0.89808	0.43984	30.809

A dispersão em relação ao eixo maior do espaço se apresenta nos autovalores de segunda ordem. Os autovalores na ACP de maior período indicam maior dispersão, o que pode indicar que as três rotações foram aplicadas adequadamente. As dispersões mais estreitas se apresentam apropriadamente nos intervalos menores. As rotações

excessivas de ordem de 60° apresentadas pelos autovalores de 0.36034 do intervalo 1996/2001, provavelmente ocorreram pela desequilibrada proporção de degradação/recuperação nas imagens das duas datas, das quais não foram extraídas exaustivamente as nuvens e suas sombras.

Na medida em que aumenta o espaço de tempo entre as imagens para análise multitemporal, a simetria entre as classes de recuperação e degradação, na imagem detecção, também aumenta. Na Figura 3.6, pode se observar que a ACP com este intervalo de tempo entre imagens fez uma rotação em excesso. Isso resultou que as áreas de alta proporção de solo nu, nas duas datas, aparecessem como recuperação.

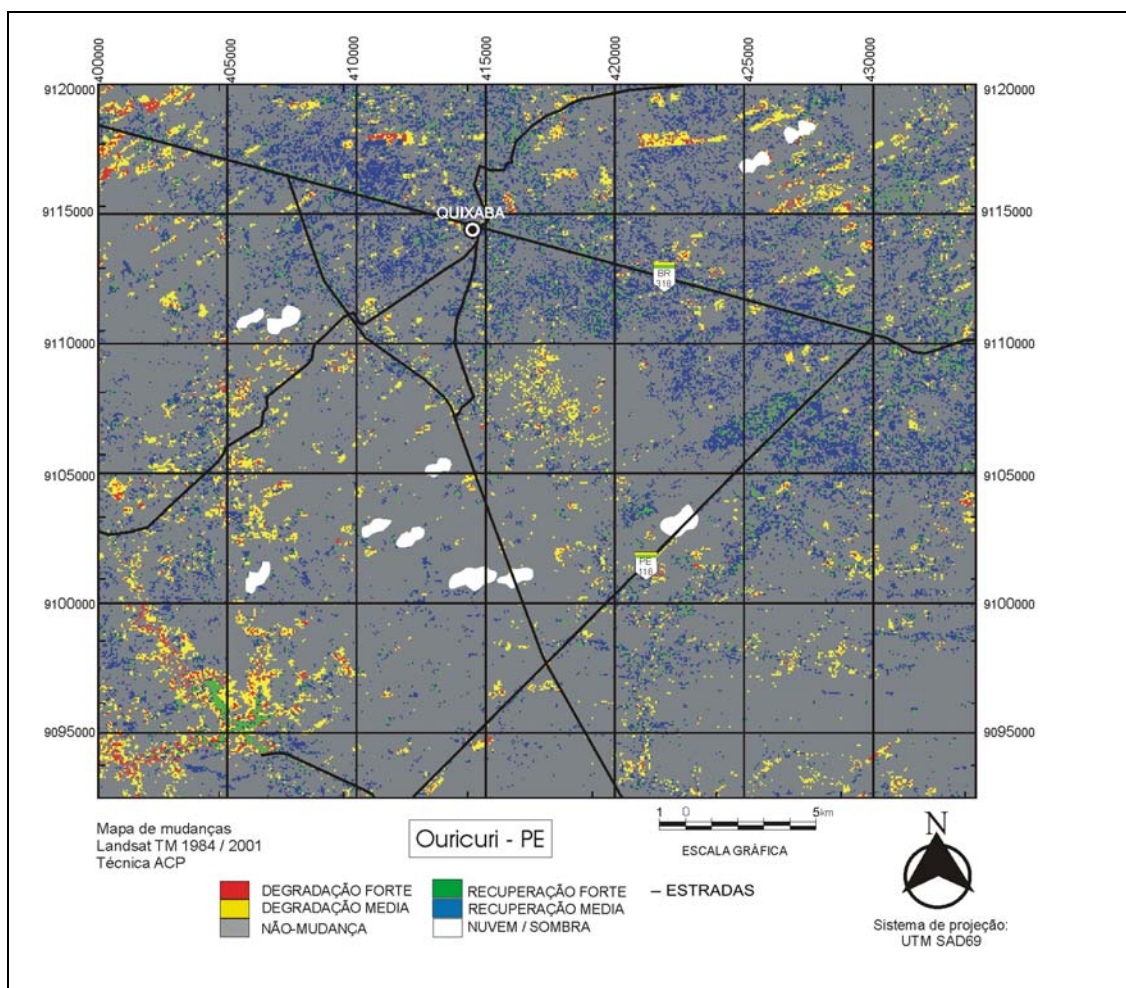


FIGURA 3.6. – Mapa das mudanças obtido pela ACP para o período 1984 / 2001.

Na Figura 3.7, a simples observação permite ver que a detecção não foi bem sucedida. O córrego Quixaba no centro da área, por apresentar-se sem lâmina d'água na época

seca, possui alta proporção de solo nu nas duas datas investigadas, aparecendo dessa forma, erroneamente como recuperação média (azul), indicando também uma rotação excessiva.

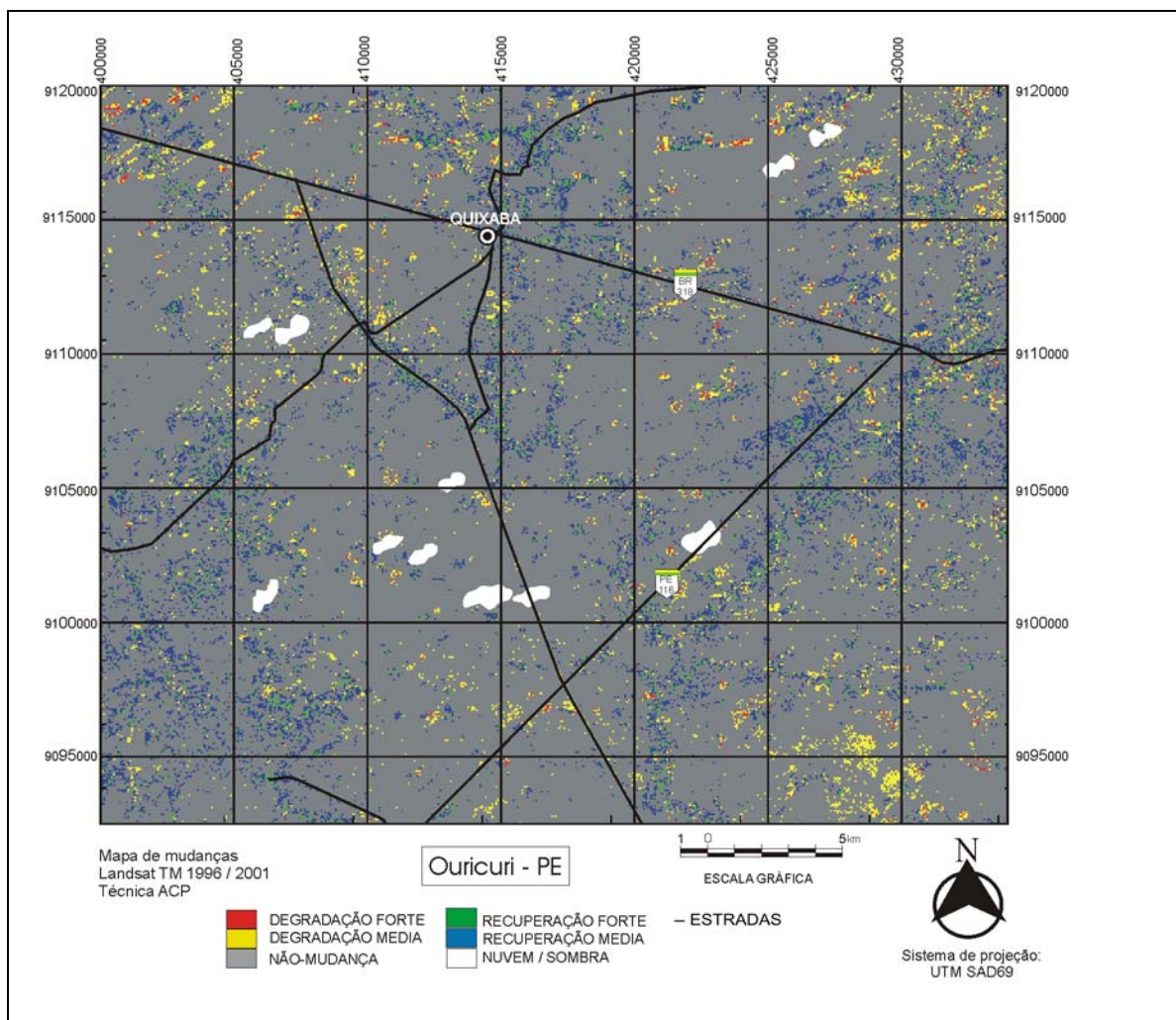


FIGURA 3.7. – Mapa de mudanças obtido pela ACP para o período 1996 / 2001.

Quando se tem uma certa quantidade de nuvens em uma das datas das imagens multitemporais, a ACP pode produzir uma rotação com magnitude muito maior ou menor do valor considerado ótimo. Os casos investigados da análise 1984/2001 e 1996/2001 são exemplos dessa rotação excessiva conforme comentado anteriormente. Na Figura 3.8 pode-se observar um exemplo de dispersograma resultante da ACP, o

qual foi rotacionado em excesso, com as áreas de solo nu sendo consideradas no fatiamento da classe recuperação média.

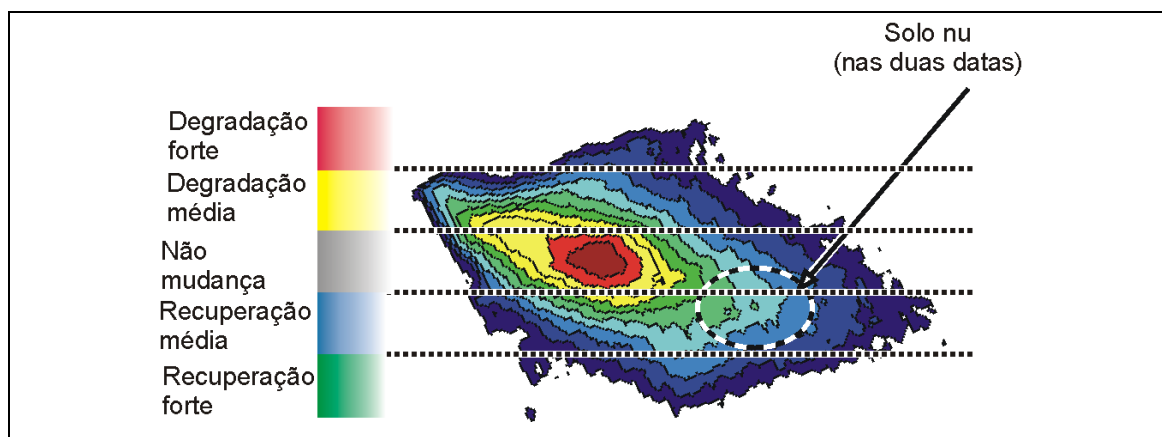


FIGURA 3.8 – Exemplo de rotação excessiva aplicada pela ACP em área do semi-árido.

Na Figura 3.9 apresenta-se o mapa das mudanças com o menor intervalo de tempo entre as imagens, 1999 até 2001. A proporção de não mudança é considerada elevada, em correspondência com a realidade do baixo intervalo de tempo da análise, (duas imagens TM de anos próximos).

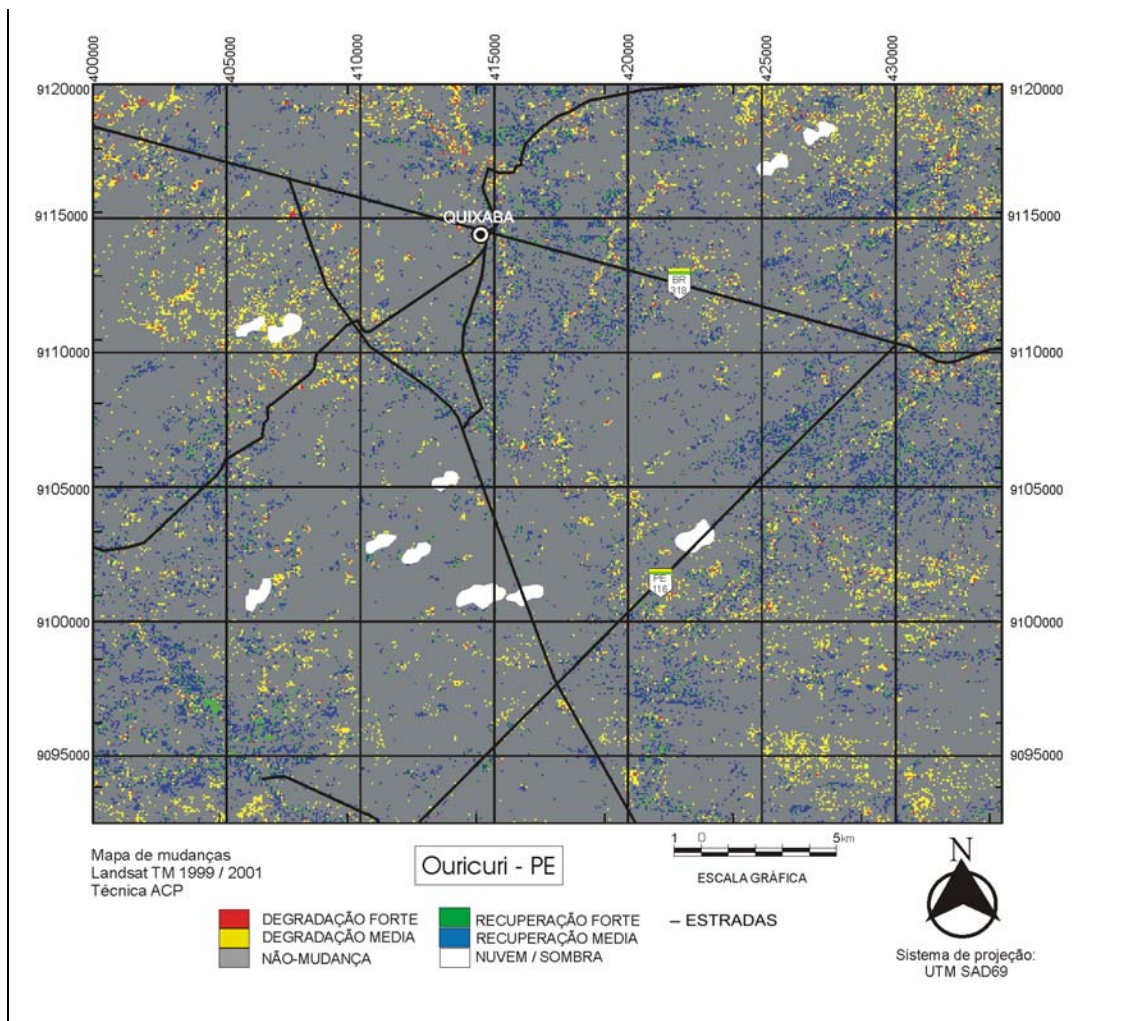


FIGURA 3.9 - Carta das mudanças obtido pela ACP para o período 1999 / 2001.

Na Figura 3.10 apresentam-se os diagramas das proporções para os três períodos da detecção com a técnica ACP, notando-se que a proporção entre classes é relativamente mantida nesses três períodos considerados. Esta simetria é parte do funcionamento da técnica, razão esta que neste Capítulo pode ser inferido que sempre haverá um desempenho não satisfatório em sua aplicação para curtos períodos da análise de mudanças, quando a recuperação da vegetação é pouca.

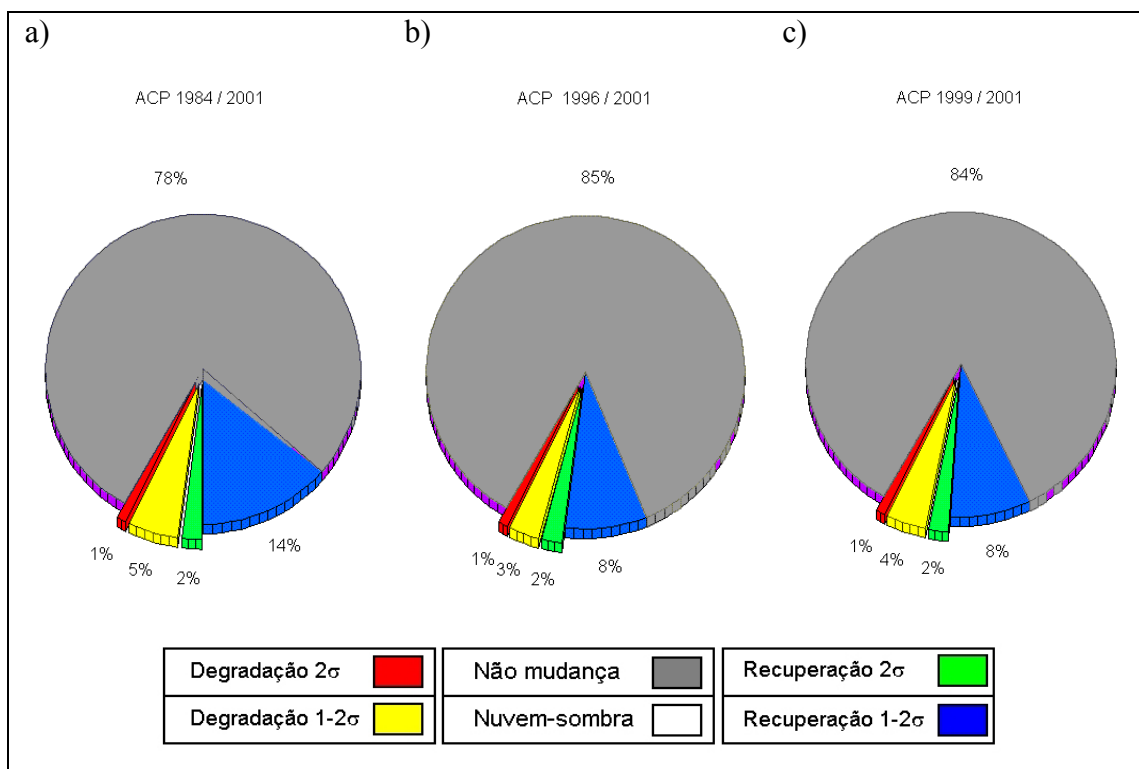


FIGURA 3.10 - Diagramas circulares das proporções entre classe para a ACP. (a) entre 1984 até 2001; (b) entre 1996 até 2001; e (c) entre 1999 até 2001.

3.4. Conclusões e Recomendações do Capítulo

Numa análise qualitativa de resultados alcançados, constantes deste Capítulo III, pode-se afirmar que a técnica baseada na diferença entre bandas obteve um bom desempenho com o par de imagens de maior intervalo de tempo e desempenho aceitável, com os intervalos menores. Esse melhor desempenho para intervalos maiores pode ser atribuído à dinâmica da atividade antrópica na caatinga. Enquanto algumas áreas estão sendo roçadas outras estão em pousio, sendo reconquistadas pela vegetação natural.

O uso da ACP também é recomendável para grandes intervalos de tempo na análise multitemporal, porém em intervalos menores ela produz muita confusão temática, sobretudo na caracterização de áreas em recuperação. De uma forma generalizada, o desempenho havido com as técnicas da diferença simples entre bandas e a da ACP sugere seu uso como referência de sucesso relativo no procedimento de análise comparativa de resultados, com aqueles obtidos do emprego das duas outras técnicas

inovadoras (RCEN e RCIA), que serão discutidas nos capítulos posteriores. É conveniente ressaltar que essas técnicas da diferença entre bandas e a ACP tem sido comumente empregadas pela comunidade científica para obtenção expedita de resultados com imagens corrigidas radiométricamente com pouca rigorosidade.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE LEVANTAMENTO DE CAMPO

4.1. Introdução

O objetivo deste Capítulo é apresentar o desenvolvimento do procedimento metodológico para levantamento de campo, voltado para caracterização fisionômico-estrutural da vegetação da região semi-árida, tomando como modelo a caatinga do nordeste brasileiro e o chaco árido do centro-oeste argentino. Para orientar a elaboração deste procedimento foi aplicada a exigência de que o levantamento fosse capaz de fornecer dados de campo suficientes e pudesse ainda, qualificar o tipo de dado. O procedimento metodológico deve colocar à disposição do usuário amostras adequadas para três instâncias da aplicação das técnicas digitais de detecção de mudanças, que serão apresentadas no próximo Capítulo. A primeira dessas instâncias é o controle propriamente dito do funcionamento da técnica digital de detecção de mudanças. A segunda instância trata do fatiamento da imagem detecção resultante, que precisa das amostras para extrair parâmetros da rotação. A terceira instância refere-se à estimação da acurácia das cartas de mudança.

Para atender a estas exigências, a técnica de levantamento de campo deve permitir a ponderação da confiabilidade da rotulação temática de cada amostra. Principalmente, porque as características radiométricas da paisagem amostrada são complexas, como já foi visto na fundamentação teórica (Asner et al., 2000). Nota-se que a confiabilidade das amostras pode variar de forma substancial, obrigando à seleção das amostras mais apropriadas para cada instância do procedimento de detecção e eventualmente, eliminar as de rotulação menos confiável.

Torna-se, portanto fundamental a eleição de um delineamento amostral que permita obter bom rendimento do levantamento, sem repetição de informação nem déficit na obtenção de dados. Neste sentido existe grande quantidade de técnicas, não sendo possível estabelecer, “a priori”, as vantagens de nenhuma em particular. O sucesso da seleção da técnica pode ser quantificado pela sua capacidade em atingir os objetivos

estabelecidos. Como também já foi visto, as técnicas mais apropriadas são aquelas capazes de obter informações relevantes com baixo custo e acurácia aceitável (IBGE, 1992). A escolha da técnica depende de fatores como tipos de informações prévias disponíveis e características da área a ser inventariada, entre outros.

4.2. Procedimento Metodológico do Levantamento de Campo

A seguir, na Figura 4.1 apresenta-se o diagrama do procedimento metodológico de levantamento de campo. Este compreende a aplicação do delineamento de amostragem, decisão da forma de amostragem do sítio, aplicação das formas de amostragem e análise e rotulação das amostras.

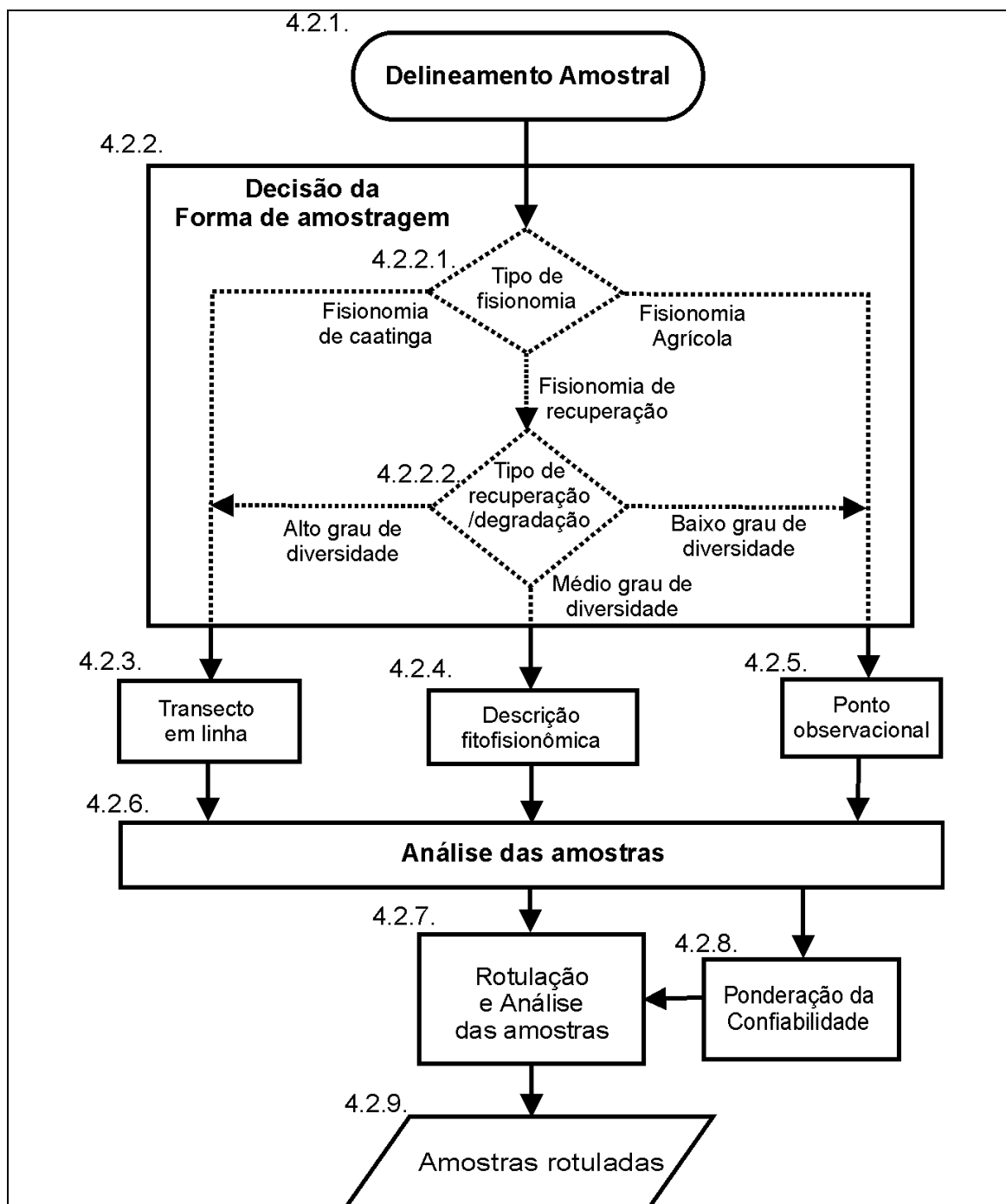


FIGURA 4.1 – Fluxograma do procedimento do levantamento de campo.

Neste procedimento metodológico o delineamento de amostragem foi um dos pontos mais críticos da campanha. Esta planificação, conjuntamente com a otimização do tempo de permanência em cada ponto amostrado, possibilitou que a amostragem fosse

mantida dentro dos limites práticos e econômicos e, ao mesmo tempo, rendendo resultados satisfatórios. Neste contexto, conforme indicado em IBGE (1992), foi adotada uma amostragem não-aleatória seletiva.

4.2.1. Delineamento Amostral: Amostragem Não Aleatória Seletiva

A interpretação prévia das imagens (na forma de composição colorida) foi fundamental para o planejamento da amostragem, com base na delimitação visual dos alvos. A imagem utilizada previamente para orientar o levantamento de campo foi selecionada de uma série de cenas TM não utilizadas para a detecção de mudanças. Isto foi definido para evitar qualquer circularidade metodológica, tanto na amostragem de campo quanto na rotulação do trabalho de gabinete. A justificativa desta opção na seleção da imagem está baseada nos trabalhos de Kazmierczak (1993) e Maldonado (1999).

No planejamento de campo, a principal consideração para a indicação do sítio representativo a ser amostrado foi a identificação na imagem e a facilidade de acesso, definindo-se a amostragem na proximidade da rede viária, respeitando o afastamento da estrada e uma distância mínima entre amostras da ordem de mil metros, o que segundo IBGE (1992), são suficientes para não repetir a informação.

Em geral, este procedimento é definido de modo que permita a aquisição do número máximo de pontos amostrais possíveis, mantendo uma adequada relação custo/benefício. A obtenção desta meta torna-se tarefa extremamente difícil quando a cobertura vegetal apresenta heterogeneidade quanto ao comportamento espectral, o que, segundo Matteucci et al. (1982), Zonneveld (1989) e Asner et al. (2000), é característico nos ambientes semi-áridos.

Quando as características da paisagem a ser amostrada são complexas, o delineamento amostral mais apropriado é aquele capaz de obter informações relevantes para atender a um objetivo com precisão e com o menor custo possível, segundo IBGE (1992). Uma das possibilidades para atingir esta meta é a subdivisão da totalidade da amostragem, em populações componentes como recomendado em IBGE (1992), caracterizando que a amostragem não-aleatória pode ser também seletiva.

Neste trabalho foi aplicado o “**Delineamento amostral não-aleatório seletivo**”, usando imagens orbitais realçadas pela análise por componentes principais para orientá-lo.

Nestas imagens realçadas foram delimitadas, visualmente, na tela do computador, áreas homogêneas com base em aspectos texturais e cores. Esta técnica ACP realça a informação da heterogeneidade da imagem, concentrando-as nas primeiras componentes. Deste modo foi feita uma imagem para a etapa de campo composta pelas bandas PC2, PC3 e Banda original TM3, como visto em Maldonado et al. (2000), realçando diferenças entre os ambientes do semi-árido. Assim, o resultado desta técnica de referência foi utilizado para orientar a estratificação do trabalho de campo. E, além dos estratos da imagem, outra consideração importante para o posicionamento do ponto amostral foi o acesso, procurando otimizar o tempo entre sítios amostrais e aproveitando a existência da malha viária em uso.

4.2.2. Decisão da Forma de Amostragem

Com a finalidade de otimizar a relação custo/benefício do levantamento de campo, foram utilizadas três formas de amostragem, selecionadas em função das características de ocupação e uso dos sítios amostrais. Esta decisão ocorre no momento da chegada ao sítio amostral e está baseada numa apreciação visual da fisionomia do local; deste modo, foram utilizadas as técnicas de:

- 1) *transectos* em linha, para caracterizar a vegetação de caatinga;
- 2) descrições fitofisionômicas simples, para áreas em pousio cercadas ou não, áreas agrícolas abandonadas ou com pouca complexidade estrutural. Esse tipo de descrição registra evidências de uso, abundância de espécies características, superfícies de solo alteradas por lavouras recentes, etc;
- 3) pontos observacionais, com descrições de roçados, culturas, currais, afloramentos rochosos e outros tipos de sítios simples.

No caso das áreas em processo de recuperação da caatinga, elas foram analisadas sob o ponto de vista da sua complexidade estrutural e botânica. Esta é avaliada por intermédio de estimativa visual do número de estratos e do número de espécies presentes no sítio a ser amostrado. Aqui, o conceito de fisionomia está relacionado com ocorrência simultânea e repetida de aspectos como tamanho e tipo de arbusto, ausência de clareiras, solo com evidências de uso agrícola recente, dominância de Marmeleiro

(*Croton sonderianus*) ou outra espécie indicadora como observado em Sá et al. (1994) e Pereira et al. (2001), entre outros.

Os pontos amostrais foram documentados com fotografias de campo, consideradas ferramentas importantes para auxiliar a fase de interpretação no trabalho de gabinete. Com base nos padrões observados nas imagens, foram selecionados para amostragem os estádios sucessionais de reconquista vegetal e os tipos de caatinga com padrões regulares de mudança e de não mudança, pois as mesmas constituem-se nas unidades de interesse deste trabalho.

4.2.2.1. Determinação do Tipo de fisionomia

A determinação do tipo de fisionomia do sítio é a base da primeira decisão na escolha da técnica que define a forma de amostragem. O caso mais complexo, que trata da vegetação de caatinga propriamente dita, foi amostrado utilizando o *transecto* em linha, como veremos a seguir:

1) Fisionomia Complexa de Caatinga: a área de Quixaba está ocupada em maior proporção pela fisionomia da caatinga. Esta é formada por um conjunto de árvores e arbustos espontâneos, densos, baixos, retorcidos, de aspecto seco, de folhas pequenas e caducas na época seca, com sub-vegetação de bromeliáceas. As espécies lenhosas (arbóreas e arbustivas) por efeito do clima, ocorrem em maior proporção que as plantas herbáceas e anuais. A área de interesse deste estudo já foi classificada tematicamente por Carvalho (1986), em sete fácies de caatinga que agrupam 17 tipos estruturais, como apresentado na Figura 4.2.

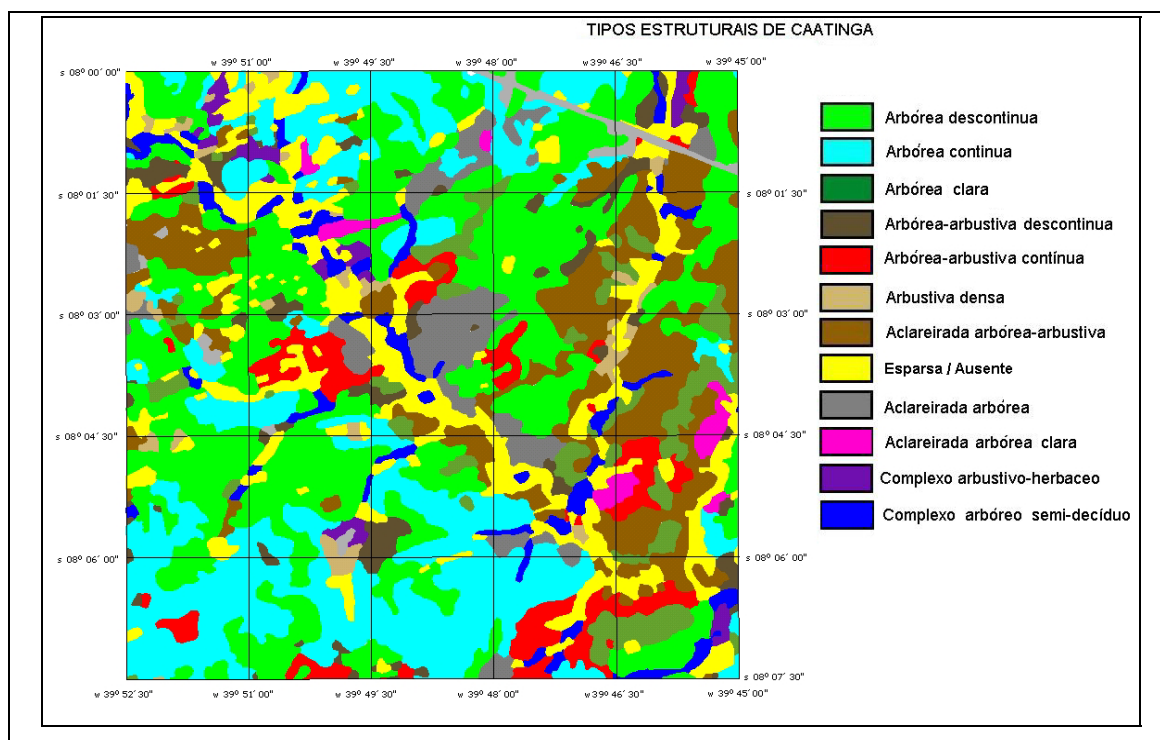


FIGURA 4.2 - Carta dos tipos estruturais de caatinga para a área de Quixaba.

FONTE: Carvalho (1986)

As fisionomias complexas de caatinga são: **Aclareirada**, que agrupa os tipos estruturais da caatinga descontinua, como as do tipo arbórea-arbustiva, arbórea e arbórea clara. A característica dominante é a presença de descontinuidades na cobertura arbustiva, com muitas áreas de solo exposto. **Arbórea-arbustiva**, que agrupa os tipos estruturais de Caatinga arbórea-arbustiva contínua e Caatinga arbórea-arbustiva densa. O estrato arbóreo é dominado pela Jurema preta (*Mimosa hostilis*), Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*) e o estrato arbustivo pelo Pereiro preto (*Aspidosperma pyrifolium*). **Arbórea**, uma forma florestal da caatinga, segundo Lima (1989), que no passado apresentou o tipo de caatinga de maior distribuição e atualmente é quase inexistente, somente encontrada em sua forma degradada. Agrupam esta fisionomia os tipos estruturais: Caatinga arbórea contínua e caatinga arbórea densa. Todas essas feições complexas de caatinga foram, nesse estudo, amostradas através de *transectos*;

2) Fisionomia Agrícola: cuja categoria agrupa as áreas em uso para cultivo, roçados, currais, vizinhança de açudes, entre outras que apresentam alta proporção de solo nu

sobretudo na época seca. Esse tipo de fisionomia foi registrada através de pontos observacionais;

3) Fisionomia de Recuperação ou de Degradação: onde estão englobadas áreas de caatinga em processo de regeneração (reconquista vegetal) ou de degradação com diferentes níveis de impacto (extração seletiva de plantas). Estes tipos de fisionomia foram amostrados através de *transectos* (quando a área apresentava elevado grau de diversidade de espécies) e de pontos observacionais (baixo grau de diversidade). Um detalhamento acerca dos níveis de recuperação/degradação relacionados a complexidade da cobertura vegetal está descrito a seguir.

4.2.2.2. Determinação do Tipo de Recuperação/Degradação

O tipo de recuperação ou degradação foi determinado através da análise combinada da composição florística e da estrutura vertical da vegetação no sítio amostrado. A complexidade da composição botânica pode refletir o estado sucessional do sítio, representado pelo tempo de atuação do processo de recuperação ou de degradação. A diversidade florística pode oferecer ainda maior informação quando analisada em função do estrato ocupado pelas espécies. A partir desta análise os sítios foram agrupados em três graus de diversidade florística: alto, médio e baixo.

1) Alto Grau de Diversidade: este tipo de condição, geralmente, é produto da recuperação da caatinga explorada seletivamente ou degradada pela retirada de madeira para serraria, cercados, lenha, carvão, etc. Conforme dito anteriormente (item 4.2.2.1), estas áreas foram amostradas com a mesma técnica de campo (*transectos*), similar aquelas de fisionomia complexa de caatinga. Independente dos tipos, recuperação ou degradação, este sítio se caracteriza pela estrutura vertical desenvolvida e número considerável de espécies lenhosas, ausência de elementos de valor econômico, arbóreo ou arbustivo, ocorrência de tocos e evidências de exploração seletiva. O conhecimento das espécies mais utilizadas localmente ajuda a reconhecer este tipo de fisionomia;

2) Médio grau de diversidade: esse nível de complexidade médio se refere a uma condição em que a cobertura vegetal apresenta uma diversidade moderada de espécies. O estrato arbustivo é dominado por duas ou três espécies características, com ocorrência de alguns elementos arbóreos jovens intercalando esse estrato. Porém, o aspecto mais

marcante é a ausência de estrato arbóreo desenvolvido. Apresentam vários outros indicadores do processo de recuperação ou sinais evidentes da pressão antrópica (indicador de degradação). Os sítios com esse grau de diversidade foram amostrados com a técnica de campo de descrição fitofisionômica simples;

3) Baixo grau de diversidade: esta condição na área de estudo, geralmente é produto da recuperação recente em áreas anteriormente utilizadas para agricultura ou pecuária. Pode ainda ser produto de degradação, ocasionada por constante pressão antrópica atuando há longa data. De qualquer forma, o sítio é caracterizado por um estrato arbustivo contínuo e baixo, com alta dominância de uma ou duas espécies, geralmente pioneiras como malváceas e euforbiáceas, de rápido crescimento, como Malva lava-prato (*Herissantia crispa*) e Marmeleiro (*Croton sonderianus*). O estado da superfície do solo também é característico. De um modo geral, quando se trata de lavouras abandonadas, o solo apresenta sinais de perda da fertilidade por compactação, perda da capacidade de infiltração ou até, por apresentar uma superfície dominada por cascalhos (produto da erosão laminar). Também podem ser observados vestígios dos sulcos das lavouras e até restos de cercados, que podem ajudar no diagnóstico das condições reinantes na área anteriormente. Independente do processo atuante, degradação ou recuperação, a técnica de campo empregada para o registro do sítio foi o ponto observacional.

4.2.3. Transecto em Linha

O *Transecto* em linha é um método de análise da vegetação que consiste em delimitar uma estreita faixa ou linha, devidamente medida, e contar as plantas ali incluídas, a fim de obter um corte transversal representativo da cobertura vegetal do sítio. Esta técnica permite apresentar numa forma simples a estrutura vertical e horizontal da vegetação, de forma que os dados obtidos possam ser representados em escala no papel e interpretados facilmente. Na Figura 4.3. nota-se a aplicação do *transecto* e a informação obtida num plano vertical cuja base está formada pela trena.

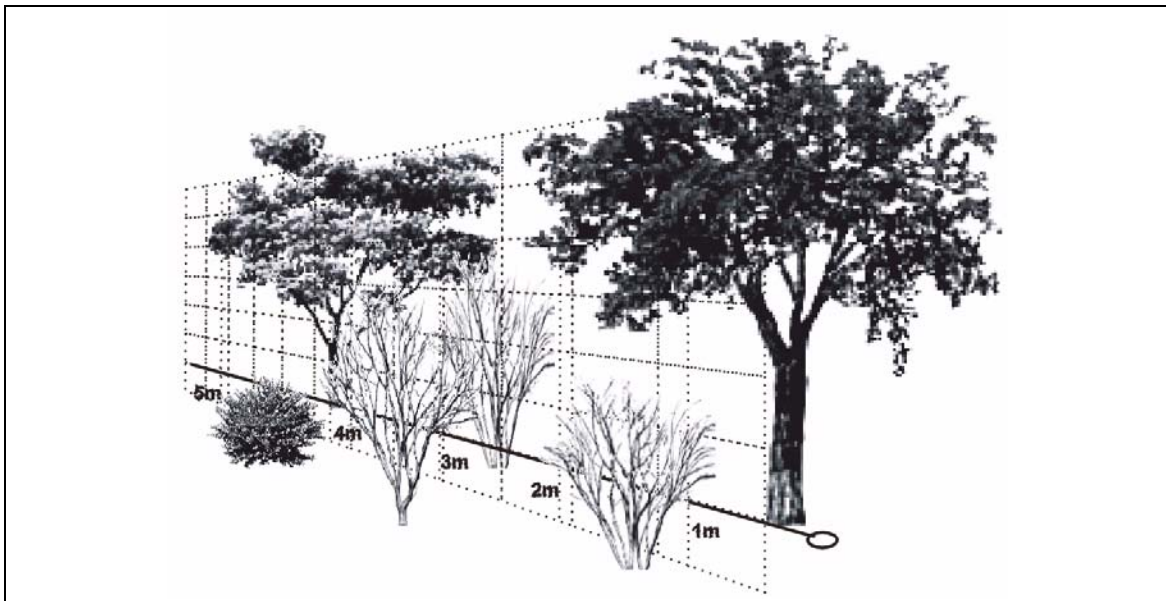


FIGURA 4.3 – Ilustração da aplicação de um transecto em linha.

Como se pode notar, nesta fase não se aplica uma amostragem com fins de mapeamento, porque os objetivos são a descrição fisionômica do sítio e a identificação das causas de mudanças na vegetação, e para isto, segundo Goldsmith (1986), são suficientes as medições de abundância.

A amostragem de pontos complexos foi feita com o uso de planilhas de *transectos* em linha, como a apresentada na Figura 4.4. Esta planilha de *transectos* foi modificada para indicar o estado fenológico das espécies identificadas ao longo da trena. Assim o levantamento pode ser definido como uma junção e adaptação do “*Transecto Cottam-Curtis modificado*” de Cottam e Curtis (1956) e do “Quadro fitossociológico” de Braun-Blanquet (1979), como apresentado em Maldonado et al. (2004) conforme Apêndice III. Numa primeira abordagem, anterior ao trabalho desta tese, foi analisado o desempenho do *transecto* em faixa *versus* o método do *transecto* em linha (Maldonado, 1999). Naquela ocasião foram verificados em campo alguns aspectos da operação de amostragem, como a dificuldade de deslocar a trena lateralmente para o *transecto* em faixa. Estas dificuldades estão relacionadas à alta densidade arbustiva e à quantidade de espinhos na maioria dos casos. O *transecto* em linha produz a mínima perturbação da vegetação que ocorre ao longo da trena, diminuindo o tempo da amostragem ao eliminar o trabalho de abrir uma picada, pois a densidade lenhosa da vegetação da caatinga,

dificulta muito esta tarefa. Isto também levando em conta que a extensão do *transecto* é considerável. O comprimento de 40m foi utilizado anteriormente, com bons resultados, para obter indicadores de mudanças na caatinga por Maldonado (1999), mas neste trabalho como estabelecido em Maldonado et al. (2004), o comprimento adotado foi de 50m.

Nesta técnica, os indivíduos e seu estado fenológico são registrados, metro a metro, na planilha de campo (FIGURA 4.4), bem como a posição do indivíduo na parcela, copa, presença de solo exposto, etc. Este procedimento permite inferir a estrutura vertical e horizontal da comunidade, indicando espécies arbóreas na linha de porte arbustivo ou herbáceo, como mostra Burrows (1990). Desta forma se obtém rapidamente na pauta da planilha os descritores de estado fisionômico, como a composição de cada estrato e a dinâmica através do estado de desenvolvimento dos elementos de cada estrato.

LOCALIZAÇÃO		RELEVO		FOTOS		GPS		MOMENTO	
Areda:		Tipo:		Nº filme:		Ponto Nº:		Data: / /	
Local:		Posição:		Nº/Rumo: /		Lat.:		Hora ini:	
Fisionomia:		Declividade:		Nº/Rumo: /		Long.:		Hora fin:	
		Orientação:		Nº/Rumo: /		Altitude:			
Distância sobre a trena (m)									
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25									
Arbóreo									
h \bar{x} =									
volume: Ba Me Alt									
Arbustivo									
h \bar{x} =									
volume: Ba Me Alt									
Herbáceo									
h \bar{x} =									
volume: Ba Me Alt									
Trepadeira									
Bromélia									
Cobertura do solo									
Superfície do solo									
Cobertura do solo		Superfície do solo		Morfogênese atual		Destruição parcial da vegetação		Indicadores pastejo	
1) Lenha grossa		1) argila		1) Nula		1) Fogo		1) Presença de veredas	
2) Lenha fina		2) silte		2) Fraca / Laminar		2) Machado		2) Esterco de gado	
3) Arvore morta		3) arenoso fino		3) Pedestal / Média		3) Colêta		3) Esterco de cabra	
4) Folhagem		4) arenoso grosso		4) Sulcos / Alta		4) Rara ou nula		4) Vegetação pastejada	
5) Serrapilheira		5) cascalho		5) Vossorocas		5) Pastoreio		5) Ausência aparente	
6) Ausente		6) seixos e matacões		6) Solterrados				6) > 4 km	
		7) rochas e blocos							
1-		7-		13-		19-			
2-		8-		14-		20-			
3-		9-		15-		21-			
4-		10-		16-		22-			
5-		11-		17-		23-			
6-		12-		18-		24-			

FIGURA 4.4 - Planilha de amostragem para o levantamento por transectos.

Esta planilha de campo (FIGURA 4.4) está formada por dois setores principais: o setor superior onde é indicada a ocorrência dos elementos ao longo da trena; o setor inferior onde encontram-se os códigos das espécies que ocorrem no sítio amostrado. As espécies vegetais são indicadas no setor superior através de seus códigos. Estas são anotadas na interseção da coluna da distância e das filas das formas ou portes das plantas. Assim, registra-se a ocorrência com o código indicador da espécie vegetal encontrada, numa

posição da planilha que menciona a forma em que ela ocorre e a sua posição ao longo da treva.

As espécies são relacionadas de acordo com o seu porte principal normal. Desta maneira, por exemplo, as espécies arbóreas, na fase arbustiva ou herbácea, indicam um estado particular da dinâmica da área. Assim, pode-se estimar o estado sucessional do ponto amostrado, mediante a observação da forma biológica da espécie, o tipo de espécie e sua abundância ou cobertura. Também são anotadas sobre a planilha observações gerais das redondezas dos *transectos*, como as de abundância e dominância das espécies indicadoras.

Quando possível, obtêm-se dados do histórico de uso da terra, coletados por intermédio de perguntas feitas diretamente aos moradores, e dados do meio físico, como a geomorfologia obtidos diretamente no terreno. Estes dados complementares podem ser aproveitados para aumentar a confiabilidade de algumas amostras, sobretudo aquelas utilizadas para o controle das técnicas digitais de detecção de mudanças.

Tomando-se como base a representatividade das áreas, foram feitos pontos amostrais em áreas de caatinga por *transectos* de tamanho fixo posicionados geograficamente com GPS. Os *transectos* foram lineares sem largura e com 50m de comprimento, dimensão essa considerada ótima, conforme Maldonado et al. (2004), que ainda acrescenta a possibilidade de diminuir para 45m, quando são utilizadas imagens com pixels de tamanho menor que os do TM/Landsat.

Neste censo, os indivíduos são representados através de dados como: altura total, nome científico da espécie e porte, conforme já foi apresentado na planilha da Figura 4.4. O porte dos indivíduos e seu estado fenológico foram registrados, metro a metro, na planilha de campo, bem como a posição do indivíduo na treva, copa, presença de solo exposto, etc. Quando existe regeneração após corte raso ou distúrbio causados por corte seletivo, o número de espécies, também pode ser usado como indicador (Moore, 1986). Cada um dos aspectos a ser estudado envolve análises com diferentes graus de complexidade. Neste método, os parâmetros a serem levantados estão relacionados com a descrição da distribuição horizontal e vertical das plantas e com a situação de algumas tidas como indicadores. Aqui não foi feita uma descrição completa de reconhecimento botânico, o que segundo Braun-Blanquet (1979) e Zonneveld (1988), somente é

necessário para estabelecer relações ecológicas entre as comunidades vegetais e para seu mapeamento.

A denominação do porte das plantas foi estabelecida com base nos trabalhos de Carvalho (1986) para manter a compatibilidade com os trabalhos anteriores feitos na área. Assim, os elementos foram classificados em arbóreo, arbustivo e herbáceo. Para o estabelecimento da altura desses estratos, direcionado para o estudo da caatinga, foram utilizados os valores: arbóreo alto (>8m), arbóreo médio (4-8m); arbóreo baixo (<4m); arbustivo alto (>4m); arbustivo médio (2-4); arbustivo baixo (<2m); herbáceo alto (>1m); herbáceo médio (0,5 a 1m); e herbáceo baixo (<0,5m). Tais critérios foram considerados na construção das planilhas, para obter a maior representatividade e comparabilidade entre censos, embora as fâcies de caatingas amostradas sejam muito diferentes entre si.

Os pontos amostrados com *transectos* são apresentados graficamente com um diagrama sintético (FIGURA 4.5) que esquematiza a cobertura vegetal ao longo da treva para posterior análise.

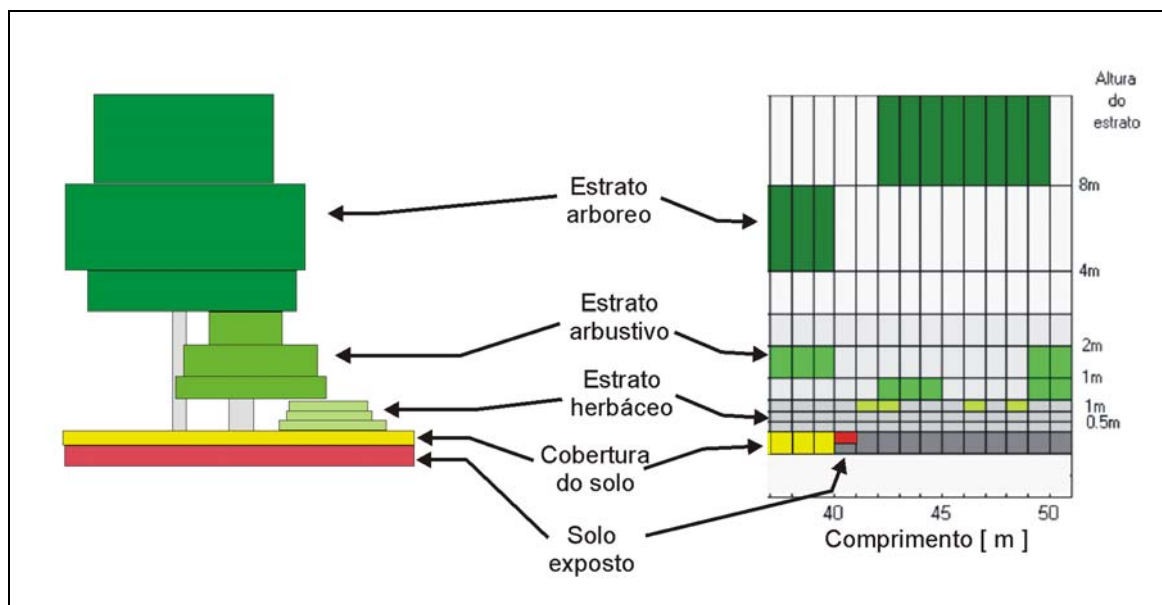


FIGURA 4.5 - Representação esquemática de um transecto, onde são representados os estratos com três substratos, a serrapilheira em amarelo, e a superfície exposta do solo em vermelho.

Em razão da importância da resposta espectral do solo, a cobertura e a textura da camada superficial do solo também é registrada, incluindo a ocorrência de fragmentos pétreos sobre a superfície do solo, folhagem, serrapilheira até galhos e lenhas fina, que na época seca geralmente são bastante abundantes, como se pode ver na FIGURA 4.6.



FIGURA 4.6 - Fotografia de um ponto amostral sobre a treva. Nota-se a superfície do solo coberta completamente por galhos e serrapilheira.

Na Figura 4.6 se apresenta a cobertura abundante do solo com materiais vegetais, que é anotada nas planilhas e representada graficamente como um elemento diagnóstico (indicador do processo). No diagrama da Figura 4.5, a serrapilheira ou folhagem cobrindo a superfície do solo é claramente representada (amarelo) em contraposição com o solo nú (vermelho). Desta forma, quando a superfície está exposta, ou seja, não tem nenhum estrato vegetal sobre ela, pode ser utilizada como indicador. Isto ocorre porque os estratos vegetais, árvores e arbustos em geral caducifólios, cobrem com

folhas secas ou serrapilheira, a superfície do solo subjacente. Este solo que evolui nestas condições protegidas tem pouca compactação o que pode ser constatado ficando uma faca no solo. A falta de cobertura sobre um solo de boa penetrabilidade pode ser utilizada, em alguns casos como indicador de degradação da cobertura vegetal. Isto porque os solos diminuem a penetrabilidade gradualmente com o tempo quando expostos ao intemperismo forte, principalmente o causado pelo sol que produz o aumento da temperatura com a conseqüente perda de carbono por oxidação da matéria orgânica. Nos lugares abertos, a resposta espectral do substrato é mais importante, por isso a condição da superfície do solo deve ser registrada. Os fragmentos de material pétreo são também anotados como cobertura na superfície do solo e são discriminados segundo a Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Escala de tamanhos dos sedimentos.

Tipo de fragmento	Tamanho [cm]
Matacão	102.4 - 25.6
Bloco	25.6 - 6.4
Seixo	6.4 - 0.4
Grânulo	0.4 - 0.2
Areia muito grossa	0.1 - 0.05

FONTE: Gerra e Cunha (1996).

A Figura 4.7 ilustra o cuidado que se tem para a aplicação da amostragem, evitando-se alterações na vegetação dentro da linha do *transecto*, para caracterizar o aspecto estrutural que produz a resposta espectral da vegetação. Nota-se na foto a perda da visibilidade sobre a trena, parâmetro esse qualitativo também incorporado na planilha.

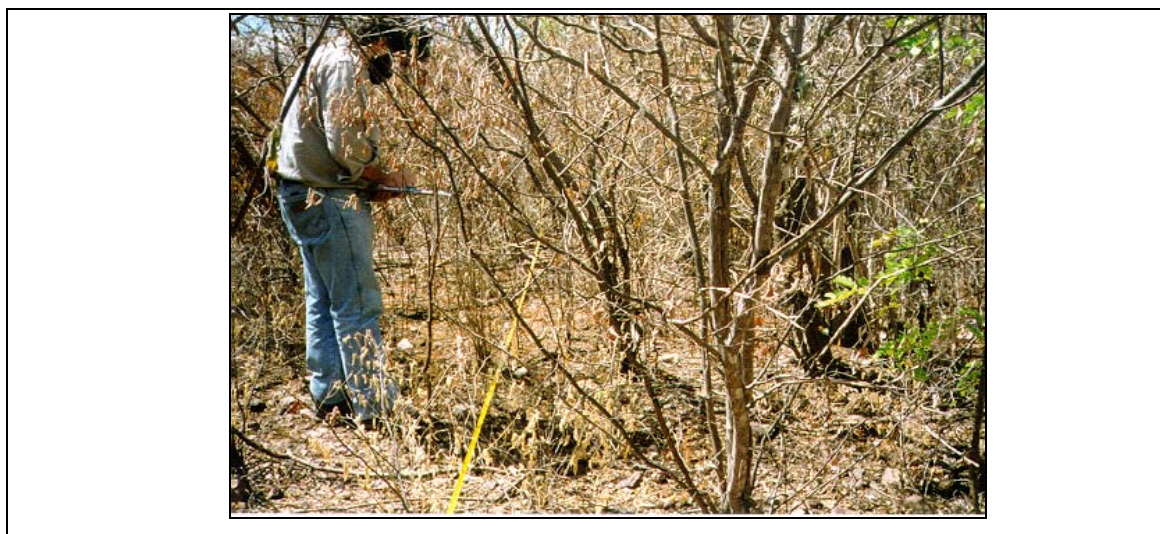


FIGURA 4.7 - Aplicação da amostragem em área de caatinga arbustiva aberta.

4.2.4. Descrição Fitofisionômica

A descrição fitofisionômica é uma técnica de levantamento de fisionomias simples que inclui somente observações fitossociológicas relevantes para o processo de detecção de

mudanças. Estes dados relevantes foram os de abundância-dominância definidos em Braun-Blanquet (1979).

Esta descrição teve somente as espécies indicadoras da dinâmica dos pontos amostrados, desconsiderando a descrição exaustiva das comunidades. Estas observações de abundância-dominância são anotadas no setor inferior da planilha de *transecto* apresentada na Figura 4.4. Neste trabalho o objetivo de descrição do sítio foi a identificação das causas de variações na vegetação, e não o mapeamento ou descrição da vegetação. Portanto, a técnica selecionada com este fim deve evidenciar causas das variações ou não, da vegetação (detecção de mudanças). Isto considerando que as plantas e demais elementos presentes no sítio, por eles mesmos provêm evidências relativas à história do sítio, pois as espécies de plantas encontradas podem mostrar a história do distúrbio, ou sua natureza (Moore e Chapman, 1986).

4.2.5. Ponto Observacional

A amostragem por pontos observacionais foi aplicada em áreas de mudança forte e não-mudança, com formas regulares. Estas são feições geralmente de uso agrícola que foram registradas de forma descritiva rápida. Os dados qualitativos foram complementados com alguns dados quantitativos de rápida obtenção, como a estimativa visual da porcentagem de cobertura, o tipo de superfície do solo, entre outras; a informação principal foi obtida através de fotografias de cada sítio. Estas foram individualizadas pelo número e pela posição geográfica do ponto do GPS e com o rumo da visada da fotografia como se mostra na Figura 4.8.



FIGURA 4.8 – Documentação das fotografias tomadas nos pontos observacionais.

Nos pontos observacionais não foram utilizadas planilhas e quando notado algum elemento de interesse potencial para a rotulação, foi anotado no croqui individualizado da fotografia.

4.2.6. Análise e Rotulação das Amostras

Após o levantamento de campo, as planilhas foram analisadas em trabalho de gabinete. Os valores de cobertura vegetal, solo exposto, foram calculados sobre a planilha, somando os pontos da mesma classe sobre o *transecto*. Estes cálculos e a representação gráfica dos *transectos* foram feitos pelo software ATRAN/SIREI 4.1 (Maldonado, no prelo) - Administrador de *Transectos* / Sistema de Rotação Radiométrica de Imagens. Posteriormente, os dados coletados foram manipulados em conjunto com uma planilha auxiliar, visando à caracterização fisionômica das formações vegetais de interesse. Assim foram analisados os parâmetros de cobertura, composição de espécies indicadoras por estrato, tipo de superfície do solo, grau de exposição da superfície do solo, superfície do solo nas clareiras, indicadores de reconquista vegetal, de atividade animal ou da pecuária, vizinhança com povoados, assentamentos humanos e açudes, entre outros.

O fato de se considerar somente cinco classes de mudanças (duas fortes, duas médias e não mudança) facilita a análise e posterior rotulação da amostra. Para melhorar a análise e rotulação das amostras, foram utilizadas duas representações gráficas complementares, como apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10.

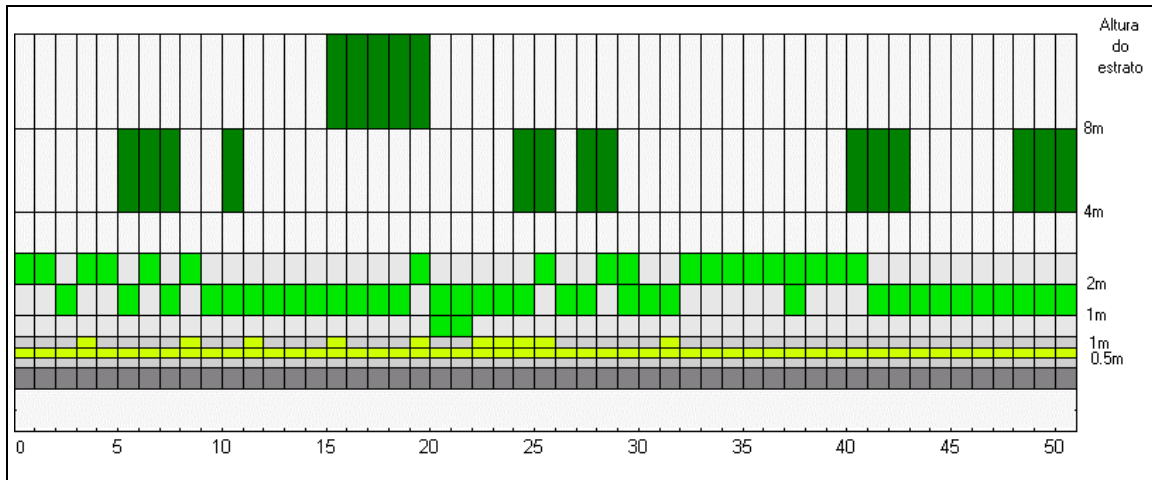


FIGURA 4.9 – Representação esquemática de um transecto, onde são observadas a estrutura horizontal e a vertical.

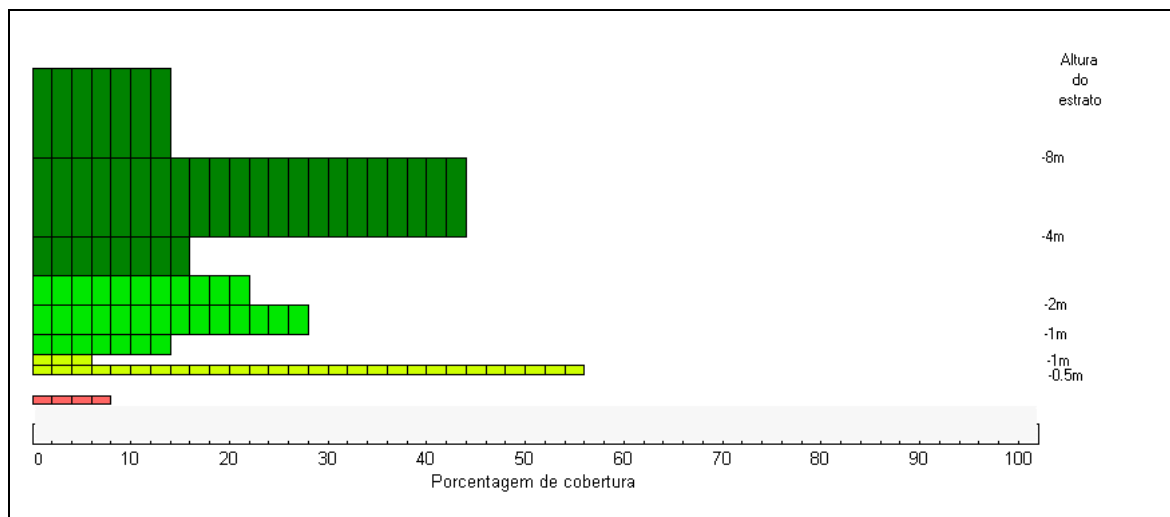


FIGURA 4.10 - Diagrama proporcional de um sítio amostral onde o eixo horizontal é a porcentagem de cobertura.

A representação na Figura 4.9 facilita a rotulação dos tipos fisionômico-estruturais de caatinga, enquanto a Figura 4.10 ajuda a comparar a rotulação do sítio, quer seja em degradação, recuperação ou não mudança. Neste caso da Figura 4.10 está ilustrada uma área a ser configurada como não mudança. Na Figura 4.9 o sítio amostrado pode ser analisado através da estrutura horizontal e vertical do *transecto*, enquanto na Figura

4.10, através da proporção de cada estrato e sub-estrato, onde o eixo horizontal é a porcentagem de cobertura. Estas representações facilitaram, no trabalho de gabinete, a análise dos dados coletados com *transectos*. Os sítios foram também analisados com apoio de uma planilha auxiliar (Tabela 4.2), que revela a situação sucessional ou dinâmica do ponto amostrado, caracterizando com símbolos, que constam na Tabela 4.2, as espécies que ocorrem na área, orientando a rotulação.

TABELA 4.2– Tabela auxiliar para análise de gabinete.

Espécie	Porte				
	Herbáceo	Arbustivo baixo	Arbustivo médio	Arbustivo alto	Arbóreo
Malva lavaprato	27 ⊗				
Carqueija	1	⊗			
Marmeleiro	3	9	2 ⊗		
Jurema preta		3		⊗	
Catingueira		2			⊗
Pereiro			1		⊗

⊗ = porte do indivíduo adulto n° = freqüência de ocorrência

Na Tabela 4.2 está exemplificada uma amostra de recuperação recente, que foi analisada conjuntamente com outros dados da planilha, como altura, superfície do solo, estado dos cercados, relatos dos moradores sobre o sítio, etc.

Para rotulação de amostras consideradas de não mudança, em áreas de caatinga arbórea localizadas em solos rasos, os elementos arbóreos podem ter tamanho inferior àqueles encontrados em solos mais profundos. Estas são situações locais que merecem atenção do intérprete quanto ao processo de rotulação. Algumas características do solo podem ser obtidas através dos mapas de solos pré-existentes, e também de observações no decorrer do levantamento botânico, baseadas na ocorrência de algumas espécies indicadoras de solos profundos, como as freatófitas e indicadoras de solos rasos, como as bromeliáceas, caroá e macambira.

Na seqüência do procedimento metodológico, as amostras foram então organizadas, primeiramente, em três classes independentemente das datas das imagens utilizadas: uma de recuperação, uma de não mudança e outra, de degradação. Numa segunda instância, após uma análise global do conjunto de dados foi inferida a percentagem de cobertura vegetal do sítio para todo o período investigado, determinando os possíveis rótulos no tempo. A informação disponível para a rotulação muitas vezes manifesta-se incompreensível por excesso de informações, ficando muito confusa a rotulação do ponto amostrado. Jeffers (1991) e Grace (1992) aconselham a construção de modelos empíricos que sintetizem a informação disponível. Estes modelos derivam de uma consideração *a priori* das relações entre os elementos do ambiente e os processos. O modelo resultante deve provar sua utilidade através da integração e da compatibilidade da informação obtida de grande número de fontes. Quando o modelo é considerado satisfatório e há suficientes provas de sua capacidade de simulação, pode ser usado para tomar decisões práticas. Neste caso, o modelo apresentado na Figura 4.11 foi utilizado com o objetivo operacional de apoiar a rotulação de mudanças em imagens da época seca no semi-árido de Ouricuri.

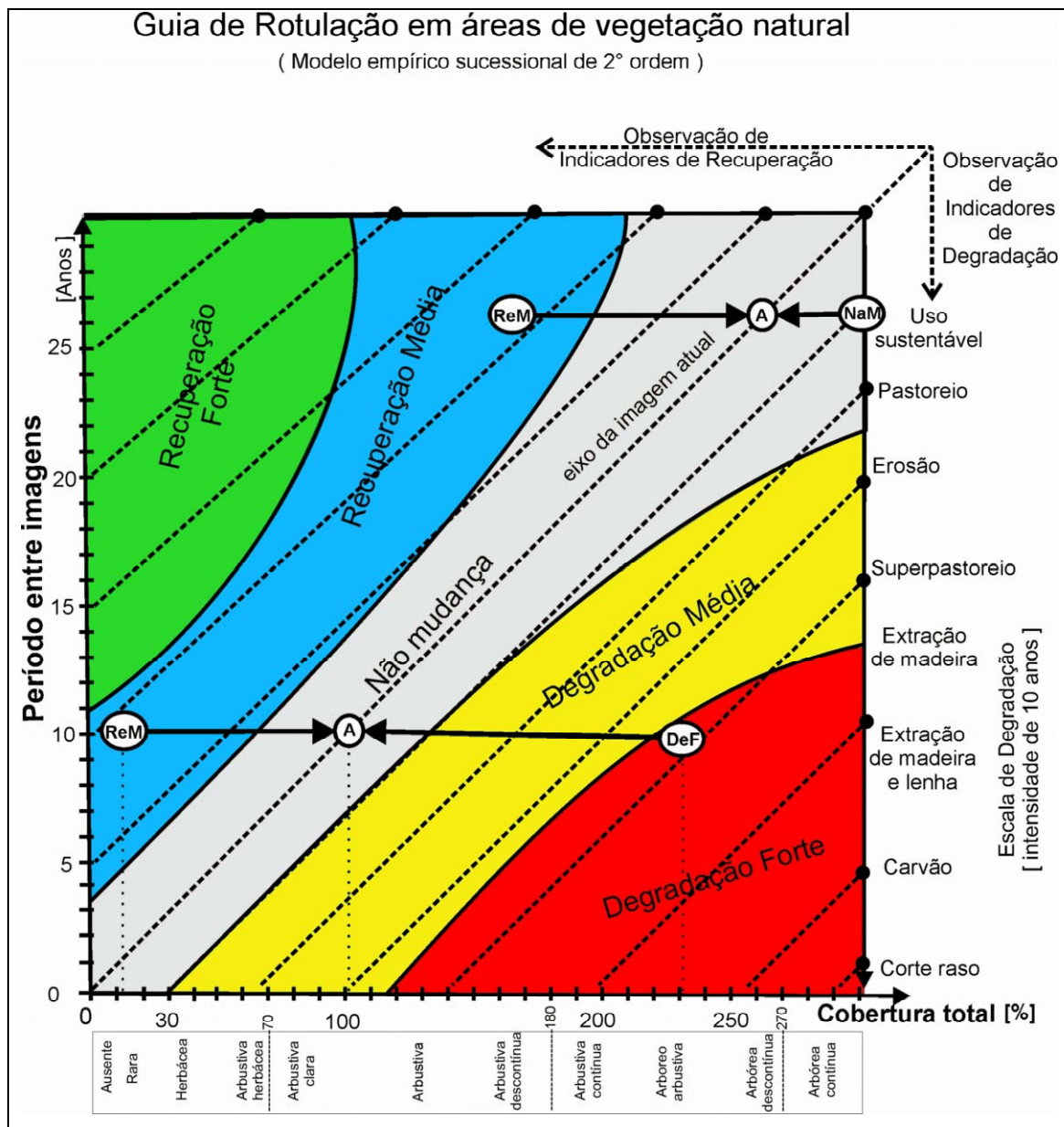


FIGURA 4.11 – Aproximação gráfica para a rotulação de mudanças na área de Ouricuri, segundo a variação de cobertura total, a fisionomia atual, o intervalo entre imagens e em consonância com o comportamento radiométrico das imagens TMLandsat.

O gráfico da Figura 4.11 é um “Modelo sucessional de segunda ordem”. Neste tipo de modelo o estado atual do sítio depende fundamentalmente do estado anterior. Assim, o principal resultado obtido neste gráfico é uma estimativa da percentagem da cobertura

do sítio na data da imagem anterior. Para ter tal estimativa deve-se seguir o procedimento:

1º passo: representar sobre a diagonal principal (linha da imagem atual), com um círculo branco (ponto A na FIGURA 4.11), a cobertura atual do sítio obtida no levantamento de campo, sendo este valor de cobertura a soma das coberturas herbácea, arbustiva e arbórea.

2º passo: analisar quais tipos de indicadores têm sido mais freqüentes no sítio amostrado. Caso sejam indicadores de recuperação, a cobertura anterior se encontrará a esquerda da diagonal principal, sobre a intersecção da horizontal que passa no ponto (A) e a diagonal do intervalo de tempo entre as imagens de interesse. Caso os indicadores sejam de degradação, a cobertura anterior do sítio estará à direita da diagonal principal, sendo determinada pela intersecção da horizontal que passa pelo ponto (A) e a diagonal indicada pelas forças antrópicas atuantes que têm produzido a degradação. O efeito combinado dessas forças, definidas através dos indicadores de antropização, posiciona no diagrama o sítio quanto à percentagem de cobertura. O desempenho no uso do guia de rotulação de mudanças depende do conhecimento do intérprete em analisar os dados sensorizados e de campo.

Outra forma de analisar o gráfico é relacionando a rotulação ao intervalo entre imagens. Citam-se exemplos: (1) nas imagens da época seca, em intervalos menores do que 5 anos, o rótulo de recuperação forte não ocorre na carta de mudanças, e os de recuperação média são pouco freqüentes; (2) em áreas de caatinga arbustiva (cobertura total <100%) somente pode ser encontrada a categoria recuperação média, em imagens com intervalos maiores do que 5 anos, e nunca a rotulação de recuperação forte; (3) uma amostra de caatinga arbóreo-arbustiva (cobertura total >200%) não pode ser rotulada como degradação forte, embora possa haver indicadores de degradação.

A rotulação, como se pode ver na Figura 4.11, depende da cobertura final encontrada e da direção e intensidade das forças de mudanças. Assim, a fisionomia atual pode orientar sobre o tipo de indicadores procurados, de degradação ou recuperação. As coberturas menores de 30% podem ser rotuladas somente como de não mudança. Os sítios com coberturas maiores que 200%, com predominância de indicadores de degradação, somente podem ser rotulados como degradação média ou não mudança. É

importante destacar que, para sítios com coberturas maiores de 200% ou inferiores a 30%, as possíveis mudanças ocorridas, independente do intervalo de tempo analisado, não são facilmente identificadas nas imagens por problemas de saturação radiométrica ou mesmo, de sensibilização do sensor. Neste caso, por características intrínsecas do modelo, que dá preferência ao comportamento radiométrico da imagem, tais sítios são inseridos na categoria de não mudança.

4.2.7. Análise e Ponderação da Confiabilidade da Rotulação

As técnicas digitais de detecção de mudanças dependem da confiabilidade dos dados do levantamento de campo, estando composta por duas partes: 1) relacionada à rotulação temática da amostra, através da capacidade da técnica de levantamento para obter as características do sítio amostrado; 2) ligada a correspondência entre os dados de campo e os valores da imagem da última data, obtida através da ponderação da heterogeneidade (variância) da radiância dos pixels vizinhos ao pixel amostrado. Na Figura 4.12 é apresentado um diagrama do *transecto* de 50m, em escala, sobre os pixels da imagem Landsat/TM.

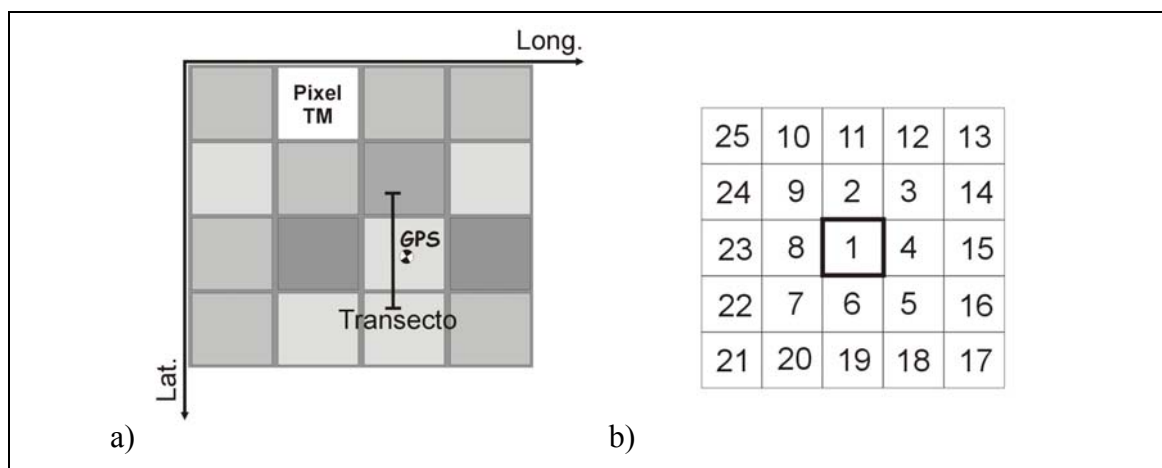


FIGURA 4.12 – Diagrama de um transecto de 50m sobre uma imagem TM com pixel de 30x30m (a); esquema dos 9 pixels amostrados para avaliar a variância da vizinhança (b).

Esse esquema mostrado na Figura 4.12b é utilizado pelo programa ATRAN\SIREI para obter a heterogeneidade dos 8 pixels vizinhos, que produz uma estimativa da confiabilidade radiométrica dos pontos na última imagem do intervalo de detecção. A heterogeneidade radiométrica assim calculada é utilizada para qualificar a confiabilidade dos pontos amostrados e utilizar os melhores para o controle das técnicas digitais de detecção de mudanças.

A precisão de localização da amostra (obtida com GPS) sobre as imagens obriga a considerar a confiabilidade da correspondência radiométrica relacionada com a heterogeneidade dos pixels, como apresentado em Maldonado et al. (no prelo). Um pixel amostrado cujos vizinhos são radiometricamente similares é mais confiável (área homogênea) daqueles com valores radiométricos distintos. Isto ocorre em razão da incerteza na identificação do pixel amostrado, produto do erro de posicionamento estimado – EPE, geralmente na ordem de 10m.

Nessa seqüência metodológica, a rotulação de amostras teve três objetivos principais: o primeiro, fornecer pontos para a instância de controle da rotação das técnicas de detecção de mudanças; o segundo, para a instância do fatiamento; e o terceiro, para o controle da acurácia dos resultados finais (mapas de mudanças). Como consequência disso, a tarefa de rotular as amostras deve ser realmente cuidadosa, necessitando da identificação do tipo de processo atuante na paisagem, no decorrer do período investigado. A rotulação da amostra com relação ao processo atuante deve-se referir ao intervalo de tempo das imagens analisadas.

4.3. Resultados e Discussão

A amostragem foi realizada em trabalho de campo na época seca, com mensurações/observações em 43 *transectos* de 50m. O levantamento foi orientado por um delineamento amostral que permitiu cumprir os objetivos estabelecidos, mantendo ainda a amostragem dentro dos limites práticos e econômicos.

O desenho da amostragem não aleatória seletiva permitiu localizar arbitrariamente as unidades de verificação em campo, seguindo critérios de acessibilidade, otimizando os tempos de deslocamento entre amostras e minimizando os percursos através da vegetação da caatinga. Para aplicar este desenho foi composta uma imagem PC2PC3Banda3 (FIGURA 4.13), para delimitar a paisagem em feições “mais” homogêneas em termos de textura e cor da imagem, facilitando a indicação da amostragem em termos eqüitativos.

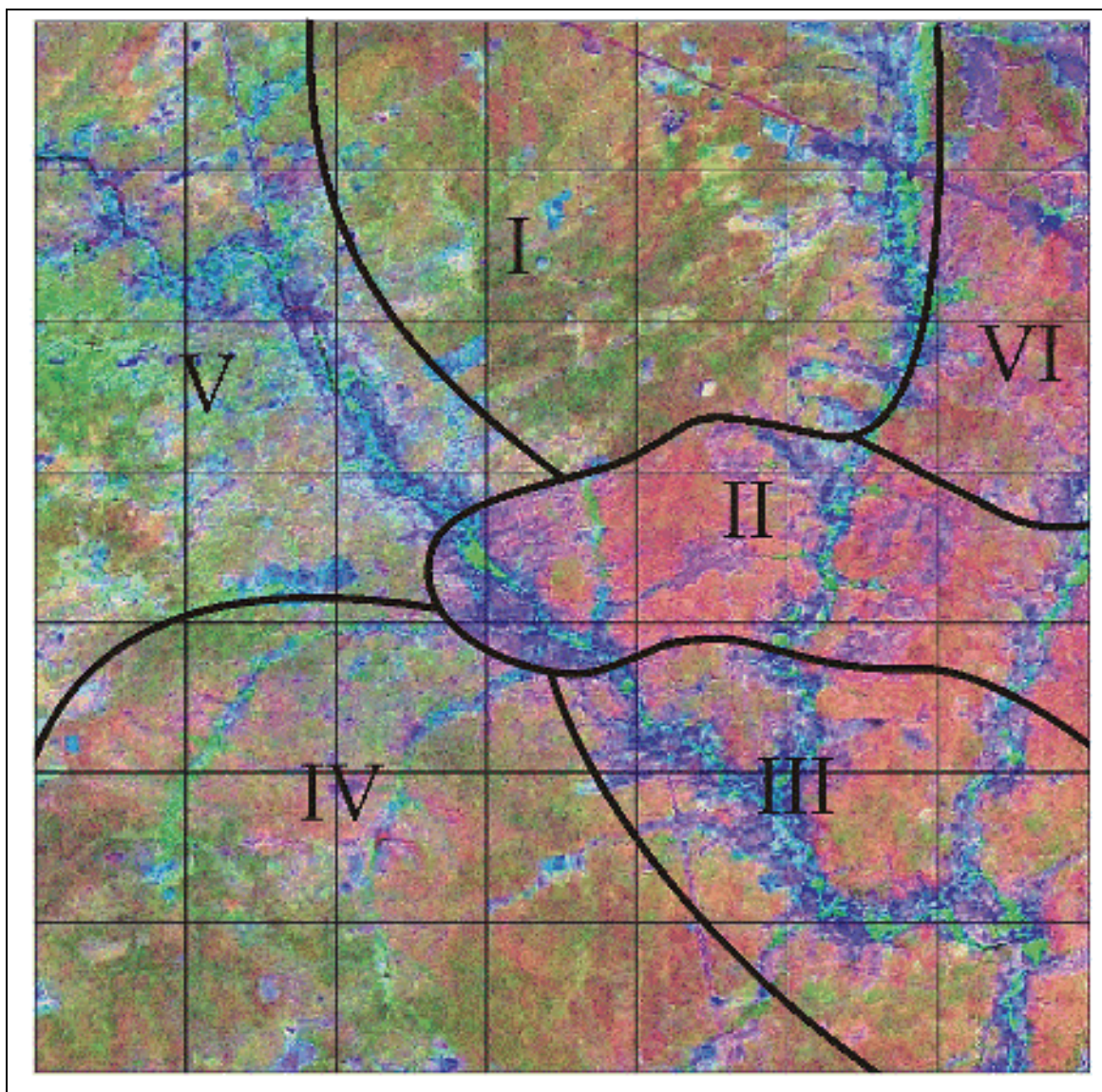


FIGURA 4.13 – Divisão da área em 6 estratos para a “Amostragem não aleatória seletiva”, sobre composição de bandas PC2PC3Banda3 de 2000.

As áreas da estratificação apresentadas na Figura 4.13 correspondem no terreno aos ambientes com características de vegetação e solos aproximadamente homogêneas, ficando assim divididos em; (Estrato I) ambiente de caatinga arbóreo-arbustiva em neossolos litólicos, (Estrato II) ambiente de caatinga arbustiva em planossolos com algumas áreas agrícolas em luvisolos, (Estrato III) ambientes de uso agropecuário intenso em áreas de luvisolos, com algumas áreas de caatinga arbustiva em planossolos, (Estrato IV) ambiente de baixa intensidade de uso agropecuário, em

caatinga arbóreo-arbustiva em solos planossolos, (Estrato V) ambiente de caatinga arbóreo-arbustiva em argissolos com algumas áreas de uso agrícola em luvisolos e (Estrato VI) ambiente de caatinga arbóreo-arbustiva em argissolos.

Esta estratificação permitiu planejar a amostragem de cada área sobre a rede de estradas, muitas das quais se encontravam em condições precárias no momento do levantamento de campo. Neste trabalho, o horizonte sem obstáculos (relevo plano) e a vegetação pouco densa permitiram o posicionamento geográfico das amostras com boa precisão. O erro estimado de posicionamento do GPS (EPE) foi em média de 6m para todas as amostras. Na Figura 4.14 observa-se a distribuição espacial dos *transectos* (círculos vermelhos) e dos pontos observacionais caracterizados em pontos azuis, sobre a mesma imagem utilizada para o delineamento em composição colorida TM453. Esta composição foi fusionada com a Banda Pancromática para obter maior resolução espacial e melhor qualidade do material impresso para utilizar no levantamento de campo (melhoria na interpretação de feições como estradas, cercados e outros).

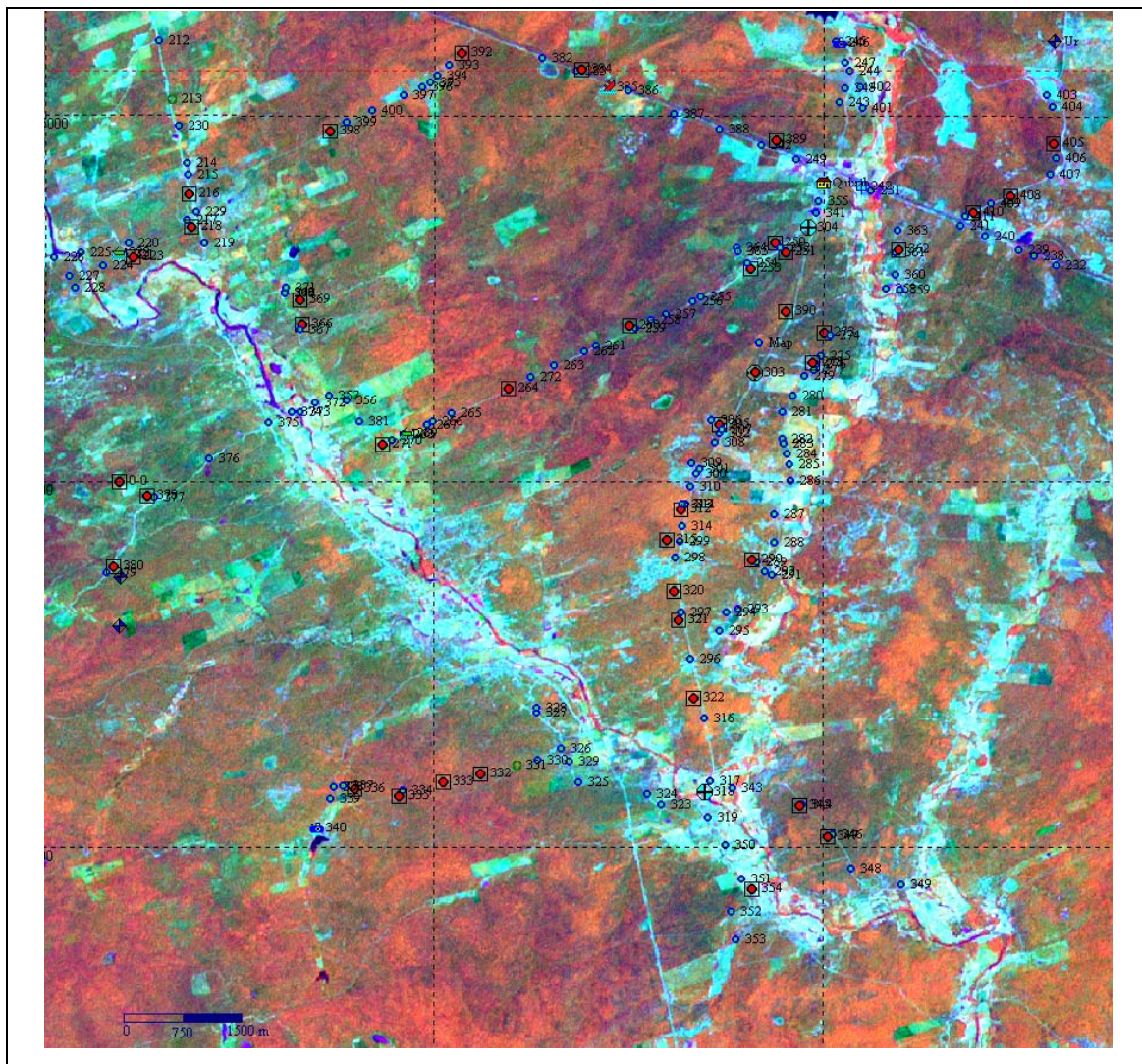


FIGURA 4.14 - Amostragem na área de Quixaba, sobre a imagem fusão de 2002 B453/Pan, em vermelho transectos, em cores azuis os pontos observacionais.

Essa imagem ETM+, adquirida no período de época úmida (FIGURA 4.14), foi adequada pelas características de contrastes entre áreas vegetadas e não vegetadas, além de ser a única imagem disponível próxima a data do trabalho de campo. A resolução espacial foi aumentada para 15m através da fusão com a banda pancromática Pan/ETM+. Neste período mais úmido há possibilidade de extração de certas faciações da caatinga como as apresentadas pela alternância de clareiras, por isso o seu uso

complementar. Reforçando a escolha deste produto na época úmida, junta-se o fato de evitar a circularidade (item 4.2.1) ao se empregar determinada série de imagens.

4.3.1. Análise e Rotulação das Amostras

Considerando que os levantamentos das informações de campo foram realizadas através de *transectos*, descrições fitossociológicas e pontos observacionais, são apresentados a seguir os resultados obtidos com estas técnicas de levantamento de campo que foram analisados e serviram para o processo de rotulação dos sítios amostrados. Considerando a importância das informações contidas nos *transectos* para rotulação das classes de recuperação e degradação, optou-se por apresentar numa secção à parte (item 4.3.1.4), designada neste trabalho como “sistematização para rotulação”, uma análise mais particularizada das estruturas horizontal e vertical (via *transectos*) de certas fisionomias de caatinga de maior representatividade e complexidade na região de Quixaba.

4.3.1.1. Transectos

A planilha do *transecto* foi a forma mais complexa para a análise do sítio e, como consequência, a informação da planilha foi complementada com duas representações esquemáticas. Essas foram geradas no módulo ATRAN do programa SIREI, o qual automaticamente faz a diagramação do *transecto* (FIGURA 4.15), calcula a cobertura por estrato, e extrai da imagem o valor correspondente da radiância da cena de última data.

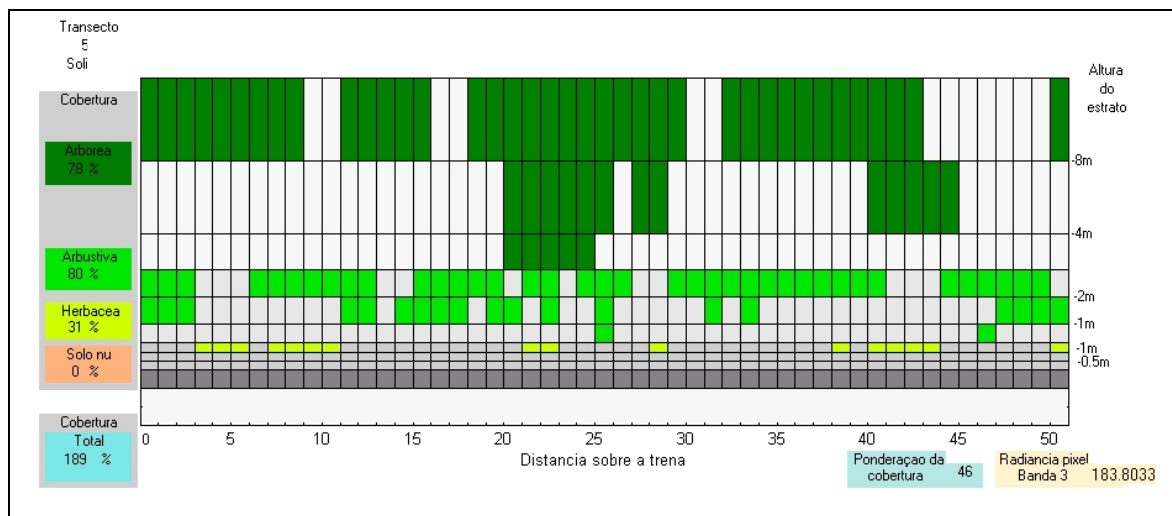


FIGURA 4.15 – Representação gráfica de um transecto que exemplifica a caatinga arbórea-arbustiva.

Este tipo de levantamento permitiu rotular sem dificuldades a dinâmica de uso e cobertura da terra, apoiando o trabalho de gabinete com as representações dos *transectos*, conforme ilustrado na Figura 4.15. O comprimento do *transecto* de 50m, nesta área do semi-árido, foi adequado para o trabalho com a resolução espacial de 30m, como discutido em Maldonado et al. (2004). Registre-se o fato de que o comprimento do *transecto*, superior ao tamanho do pixel, pode trazer alguma contaminação nos dados por abranger pixels vizinhos. Tal fato não é considerado importante quando se trata com áreas radiométricamente homogêneas, como ocorre em matas e arbustais densos; contudo, esse fato merece atenção, em áreas de cobertura vegetal mais rala ou de um ambiente degradado, pela heterogeneidade radiométrica, resultante de possíveis agrupamentos e clareiras que formam um mosaico irregular, que influenciam a resposta do pixel no sensor utilizado.

4.3.1.2. Descrição Fitofisionômica Simples

Para esta forma de levantamento foi utilizada a primeira folha da planilha do *transecto* em linha, sem preencher a pauta da trena. Isto permitiu repetir alguns dados de valor para caracterizar as áreas e manter uma certa comparabilidade entre os métodos de

levantamento. As descrições fitofisionômica simples foram utilizadas em áreas em recuperação ou muito degradadas que não precisaram dos *transectos*. Exemplifica-se resumidamente dois casos de descrição fitofisionômica simples, citados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3- Casos de rotulação segundo o intervalo de tempo entre imagem.

Amostras	Intervalo		
	1984-2001	1996-2001	1999-2001
#1	não mudança	recuperação média	não mudança
#2	degradação média	recuperação média	não mudança

A amostra #1 (Tabela 4.3) é um caso documentado de queimada ocorrida no ano 1987, em que uma ampla área foi totalmente consumida, segundo informações históricas e confirmadas pelo auxiliar de campo (FIGURA 4.16). Esse sítio está atualmente ocupado por uma densa cobertura herbácea de malva lava-prato (*Herissantia crispa*) e arbustiva baixa e esparsa de moleque duro (*Cordia leucocephala*) e jurema preta (*Mimosa hostilis*).



FIGURA 4.16 – Aspecto de caatinga arbórea-arbustiva descontínua, degradada pelo processo de queima no ano de 1987.

Na amostragem apareceram ainda vários indicadores deste evento: carvão, tocos carbonizados, restos de cupinzeiros arbóreos no chão, falta de elementos arbóreos de porte adulto, pouca diversidade de arbustos, com sub-estrato arbustivo médio e alto, entre outros (FIGURA 4.16). Estes indicadores evidentes permitem inferir que a rotulação possui adequada confiabilidade no intervalo 1996/2001. Porém o rótulo do intervalo 1984/2001 não é confiável, pela falta de indicadores desse período, os quais foram eliminados pelo evento de 1987. Por sua vez, o rótulo do intervalo menor (2 anos) é confiável e está relacionado com a lenta recuperação evidenciada pelas comunidades vegetais observadas no levantamento.

A amostra #2 (Tabela 4.3) é um caso de exploração agrícola antiga que deve ser analisada como um sítio de alternância de cultivo e pousio. Este sítio foi recentemente abandonado pela perda da parte arável do solo, pelo conseqüente aumento do material litólico na superfície. A análise das imagens multitemporais num intervalo de dois anos (1999/2001) não permitiu detectar nenhuma mudança, nem recuperação ou degradação, embora esta área esteja em fase de recuperação inicial, com uma arbustização de marmeleiro (*Croton sonderianus*) e jurema preta (*Mimosa hostilis*) de porte arbustivo baixo. Nota-se que, na imagem detecção de intervalos menores, não é fácil identificar essa fase de recuperação em área de baixa cobertura vegetal, através de mudanças radiométricas nas cenas, para essas áreas de solos pobres. Contudo, existem arbustizações estabelecidas em áreas férteis de pousio ou culturas perenes de palma, que podem ser detectadas tematicamente como recuperação, em períodos curtos nas imagens da época seca.

4.3.1.3. Pontos Observacionais

O recurso fotográfico na amostragem de pontos observacionais foi muito importante, apoiando análises posteriores do levantamento. Estas ilustraram inequivocamente o ponto, através do posicionamento com GPS e do rumo da visada da fotografia. A seguir, na Figura 4.17, exemplifica-se a documentação de um ponto observacional.

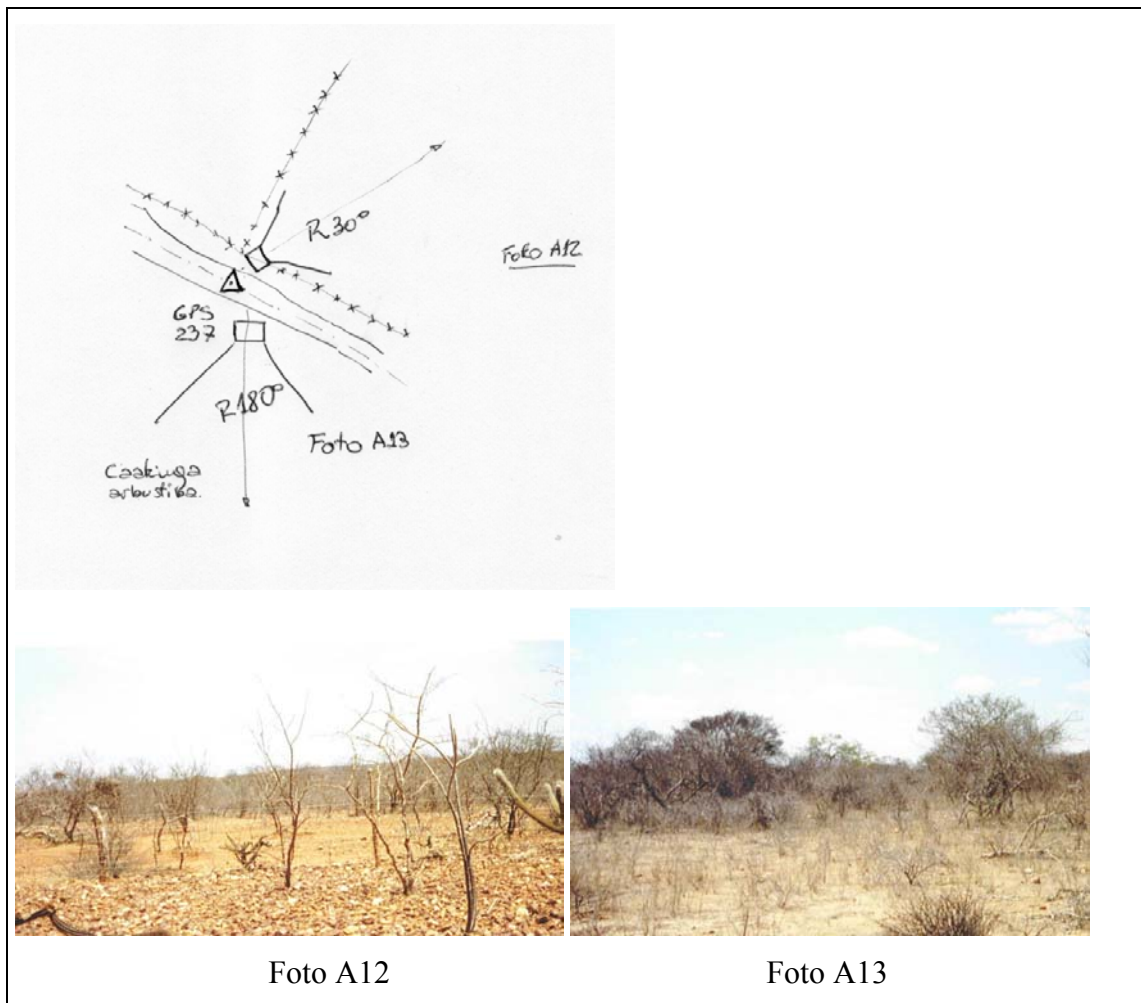


FIGURA 4.17 - Croquis do levantamento de um ponto observacional. As duas fotografias são individualizadas, no campo, pelo ponto do GPS e o rumo da visada da foto.

Os pontos observacionais em sua grande maioria foram situados sobre as estradas, documentando as clareiras e áreas antropizadas com fotografias e descrições simples. A maioria das vias de acesso nesta região da caatinga foram utilizadas para obter uma amostragem rápida e de grande riqueza descritiva, como se mostra na Figura 4.17. As amostras assim documentadas abrangeram também as vizinhanças dos pontos, sendo fonte auxiliar em numerosos esclarecimentos sobre a identidade temática dessas áreas vizinhas aos pontos amostrados.

4.3.1.4. Sistematização das Informações dos *Transectos* para Rotulação

No trabalho de gabinete as planilhas oriundas dos *transectos*, tendo informações sobre cobertura vegetal, solo exposto, tipo de superfície do solo, indicadores de reconquista vegetal, de atividade animal, vizinhança com povoados, assentamentos humanos e açudes, foram detalhadamente analisadas para se atingir um rótulo adequado do sítio, em termos de degradação ou recuperação. Isto foi possível avaliando uma série de indicadores que, por sua ocorrência atual na área, podem caracterizar o processo de dinâmica da cobertura no decorrer de todo o período investigado. Esse estado atual do sítio amostrado foi o primeiro elemento para posicionar a amostra no modelo de segunda ordem da Figura 4.11. Numa segunda instância, para orientar a rotulação, foram identificados, no diagrama dos *transectos* e nas fotografias, esses indicadores de mudanças, tais como espécies dominantes, estrutura vertical, correspondência da serrapilheira com o estrato arbustivo, distúrbios por queimadas ou secas, etc.

A seguir se apresenta a rotulação de alguns sítios característicos de caatinga, caracterizados através dos *transectos*, conforme graficamente ilustrados nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21. Na Figura 4.18 pode-se observar o diagrama da caatinga arbórea arbustiva, na qual se distinguem facilmente as discontinuidades em ambos os estratos. No caso da Figura 4.18, o sítio amostrado foi rotulado como não mudança ao longo do período investigado. Isso, principalmente em base à estrutura por idades, não se encontrando indivíduos jovens no estrato arbóreo e arbustivo, mas sim, a presença de um estrato arbustivo desenvolvido, com abundância de indivíduos já em fase adulta. Esta diversidade arbustiva é um dos principais indicadores de não mudanças ou até mesmo, uma alteração historicamente antiga.

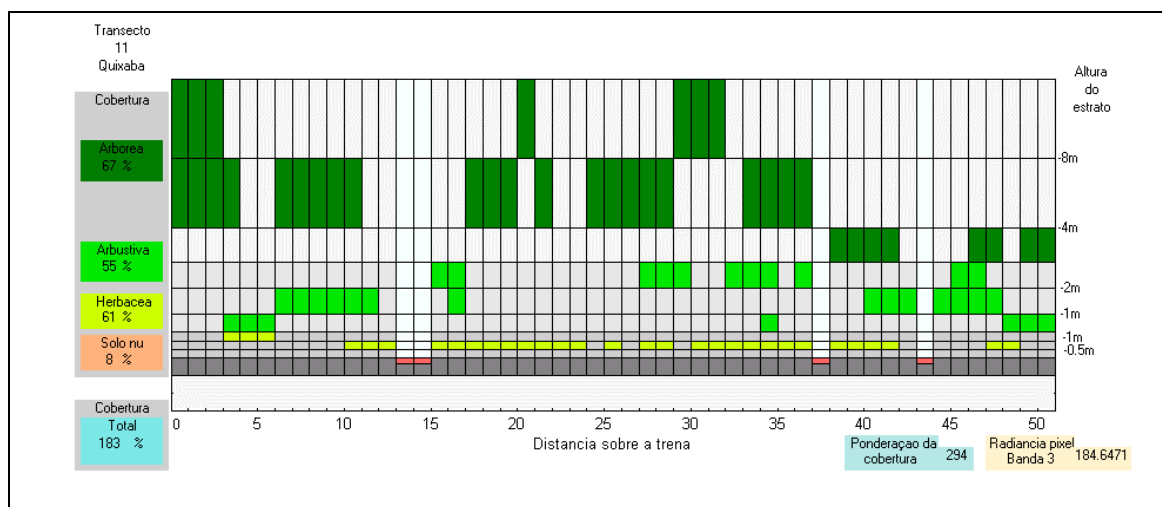


FIGURA 4.18 – Diagrama do transecto em caatinga arbórea arbustiva descontínua (8% de solo nu).

O transecto da Figura 4.19 foi rotulado como recuperação (processo contínuo) ao longo do intervalo investigado, por ser constituído de um estrato arbustivo formado quase exclusivamente por marmeleiro (*Croton sonderianus*) e jurema preta (*Mimosa hostilis*), e indivíduos arbóreos ainda de porte arbustivo. O estrato arbóreo ainda está em desenvolvimento, apresentando ainda alguns indicadores de degradação antiga, como a presença de tocos e erosão profunda.

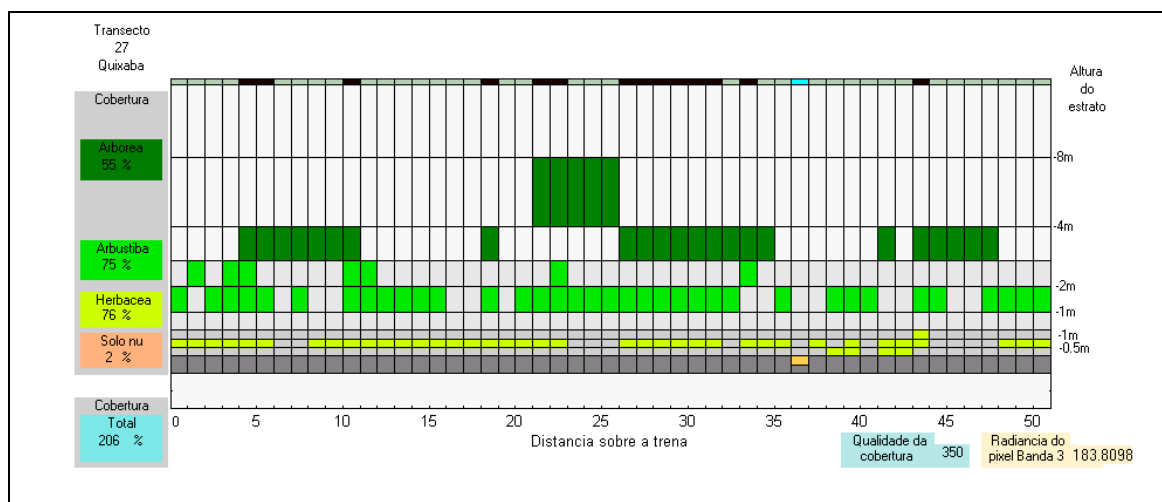


FIGURA 4.19 – Diagrama do transecto em caatinga arbóreo-arbustiva contínua (2% solo nu).

Na rotulação deste caso da Figura 4.19 deve-se considerar que o processo de dinâmica não foi contínuo, referindo-se então a duas fases, por serem encontrados no sítio, indicadores de antigo processo de degradação (extração seletiva de madeira) e mais recentemente, um processo de recuperação (elementos arbóreos jovens e de porte arbustivo). Fazendo-se uma análise de detecção de mudanças por longo período, o rótulo desse sítio deve ser considerado como não mudança; caso a análise seja de curto intervalo de tempo (2 a 5 anos), a designação do sítio deve ser de recuperação média. Caso fossem observados indicadores como roçado ou queima, no decorrer da análise multitemporal, seguindo as orientações do modelo sucessional (FIGURA 4.11), tal sítio poderia, em alguns casos, ter uma rotulação de mudança forte, mesmo apresentando ainda uma cobertura total superior a 200%.

O caso da Figura 4.20 trata de um caso típico de recuperação em área agrícola, onde se observa a falta de um estrato arbóreo, com dominância do marmeleiro (*Croton sonderianus*). Neste sítio também foram observados indicadores de uso agrícola, com a abundância de cascalho no solo, o que permite inferir que o sítio foi abandonado à recuperação da caatinga (aproximadamente a 8 anos). No período investigado de 5 anos esse sítio está inserido na categoria recuperação forte, porém num prazo longo (17 anos) conforme estudado, esta amostra não teria confiabilidade para ser rotulada nesta categoria.

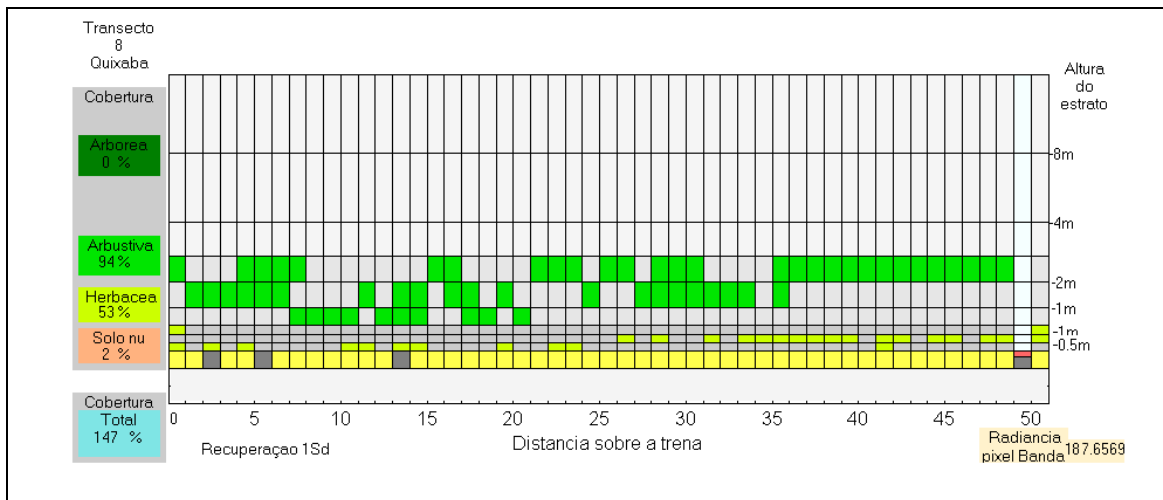


FIGURA 4.20 – Diagrama do transecto em caatinga arbustiva contínua (98% de cobertura total).

Na Figura 4.21 é apresentado um perfil da caatinga aclareirada arbóreo-arbustiva degradada. Nesse perfil há uma falta de correspondência entre os diferentes estratos e a cobertura da superfície do solo, conjuntamente com a boa penetrabilidade do solo exposto, o que determina com relativa certeza, uma perda recente de cobertura vegetal; e num caso contrário, significaria recomposição da cobertura.



FIGURA 4.21 – Diagrama do transecto em caatinga aclareirada arbóreo-arbustiva, com a representação da serrapilheira para indicar a degradação.

Na Figura 4.22 é apresentado um diagrama da percentagem de cobertura na estrutura vertical (sub-dividida em camadas), exemplificando com um sítio amostral rotulado como não mudança. Observam-se elementos em todas as camadas, elevada proporção de cobertura na estrutura vertical formada pelos indivíduos arbóreos e arbustivos. Este tipo de diagrama permite uma rápida análise comparativa entre *transectos*.

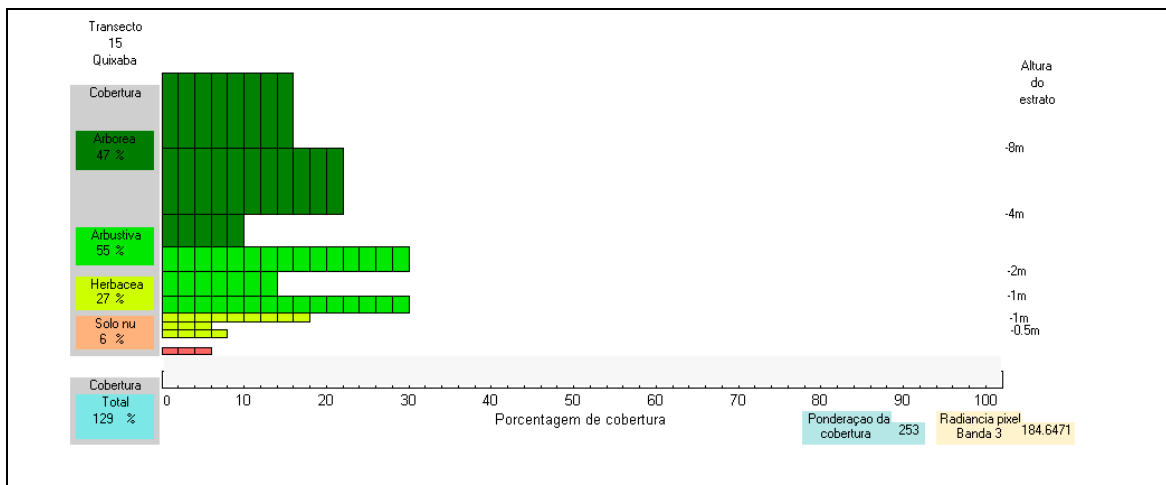


FIGURA 4.22 – Diagrama das proporções da cobertura vegetal por estratos em caatinga arbóreo-arbustiva.

A presença de elementos nas camadas superiores de cada estrato é característica de estado maduro da vegetação, podendo ser indicativo de rótulo de não mudança, contínua ao longo do período investigado. A seguir, na Figura 4.23, é mostrado um diagrama das proporções do *transecto* em caatinga arbustiva na fase de recuperação, onde o estrato arbustivo é dominante, com uma maior percentagem de cobertura arbustiva na camada entre 1 e 2m de altura, indicando claramente uma recuperação que ocorre a curto tempo. Isso é reforçado ao se observar no sítio uma alta dominância do marmeleiro (*Croton sonderianus*), espécie arbustiva comum nas fases de regeneração. Esta área parece indicar estar em pousio, sendo rotulada como recuperação média num curto intervalo de análise (até 5 anos). Como a dinâmica desta área em período longo faz parte do ciclo agrícola que alterna cultivo e pousio, a rotulação desse sítio torna-se pouco confiável numa análise que envolva imagens de anos muito distantes.

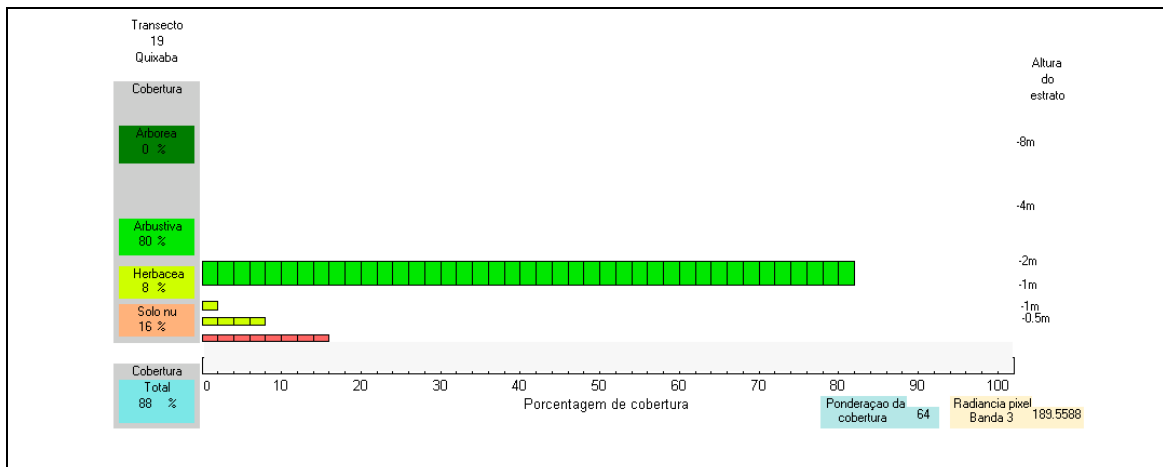


FIGURA 4.23 – Diagrama das proporções da cobertura vegetal por estratos em complexo arbustivo.

A Figura 4.24 apresenta um diagrama das proporções de cobertura em caatinga esparsa que não apresenta indicadores claros de recuperação.

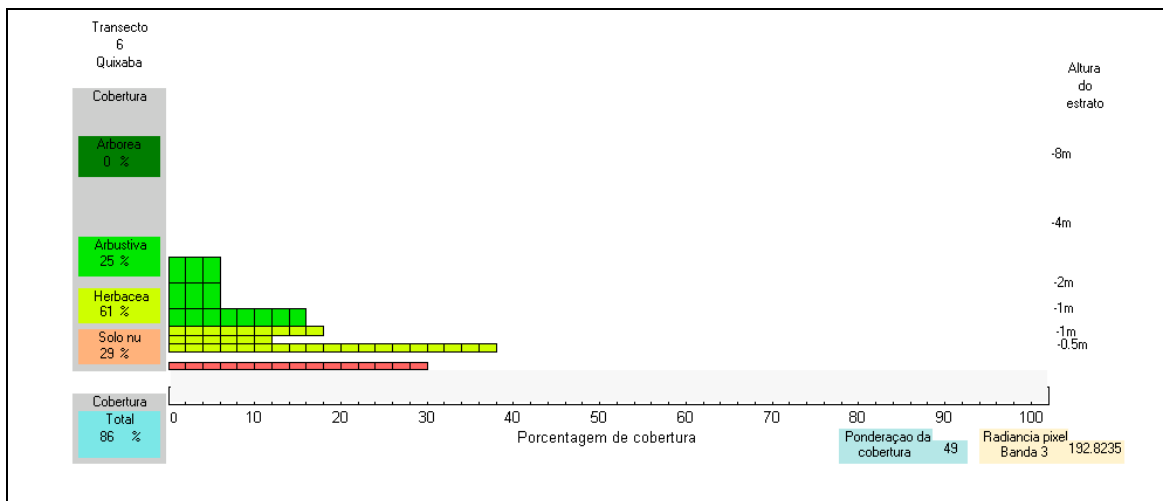


FIGURA 4.24 - Diagrama das proporções da cobertura vegetal por estratos em caatinga esparsa muito degradada.

Na planilha desse *transecto* (FIGURA 4.24) foi constada a falta de indicadores de mudança, com estrato arbustivo formado por elementos de pinhão bravo (*Jatropha pohliana*) e carqueja (*Calliandra depauperata*) de porte adulto, ausência de indivíduos

jovens, solo podzólico, evidências de pastoreio caprino, e nenhum indicador de degradação por uso agrícola. A rotulação desse sítio ao longo de todo o período investigado foi de não mudança.

4.3.2. Análise e Ponderação da Confiabilidade da Rotulação

Conforme comentado anteriormente (Item 4.2.7) as técnicas de detecção de mudanças dependem da confiabilidade dos dados de campo, sob dois aspectos: o primeiro, relacionado à própria rotulação temática da amostra através de características do sítio, levantadas em trabalho de campo; segundo, a correspondência entre dados de campo e da imagem da última data do período investigado, através da estimação da heterogeneidade da radiância dos pixels vizinhos ao pixel amostrado.

Em consonância com o primeiro ponto de vista pode-se afirmar que, a presença de apenas um tipo de indicador para as categorias de não mudança, degradação ou recuperação, já permite considerar confiável a rotulação temática. Contrariamente, a ocorrência simultânea de vários tipos de indicadores num determinado tempo, demonstra variações/alternâncias na dinâmica de cobertura da terra, diminuindo assim a confiabilidade da rotulação temática para um dado período.

Num outro contexto de observação, pode-se comentar que a perda de confiabilidade na rotulação é devida à heterogeneidade do conjunto de pixels vizinhos daquele no qual está inserido o pixel amostrado, na imagem da última data, como se apresenta na Figura 4.25. Tal heterogeneidade afeta a correspondência da radiância extraída da imagem com a rotulação associada a amostra; no caso de um sítio com rotulação de não mudança, isto pode ser altamente nocivo ao funcionamento das técnicas digitais de detecção de mudanças RCEN e RCIA.

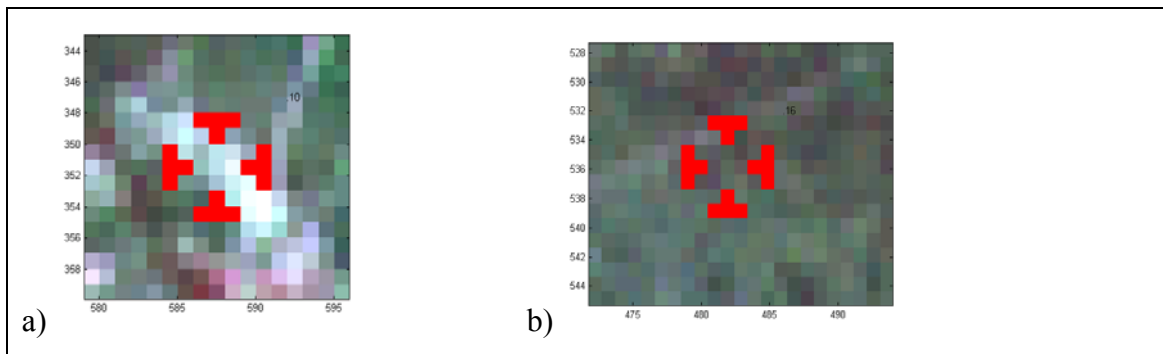


FIGURA 4.25 – Sítios amostrados de alta (a) e baixa (b) heterogeneidade radiométrica em imagem TM/Landsat.

O conjunto de pixels apresentados na Figura 4.25a corresponde, como exemplo, a um sítio (*transecto* 10) de alta heterogeneidade em caatinga arbustiva aclareirada, localizada em planossolos no centro da área de Quixaba. Na Figura 4.25b o conjunto de pixels corresponde à caatinga arbórea-arbustiva, de alta cobertura e baixa heterogeneidade radiométrica, em solos podzolizados do norte da área (*transecto* 16).

Como forma de facilitar a compreensão dessa relação de dados de campo e aqueles das imagens de satélites, é exemplificado o caso de um sítio rotulado como recuperação forte no período de detecção 1984/2001 com alta confiabilidade (FIGURA 4.26). Este sítio foi uma exploração agropecuária abandonada de longa data, segundo evidências de campo confirmadas pelo histórico local, estando hoje como uma caatinga arbórea-arbustiva.

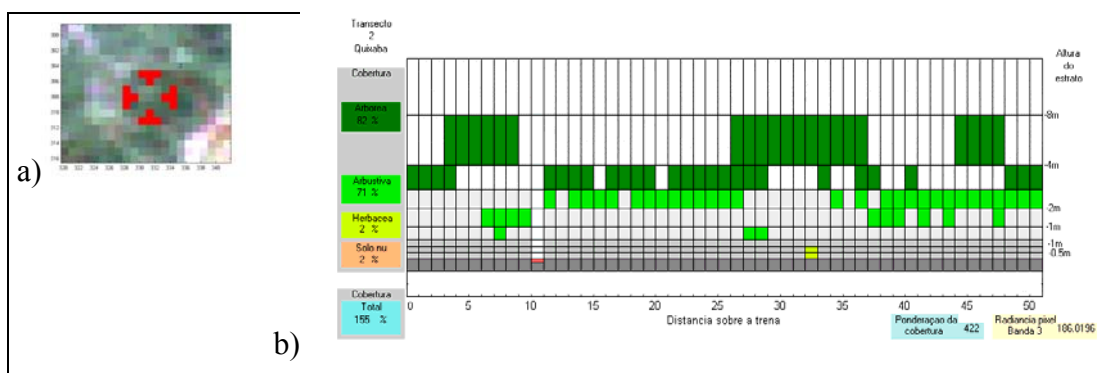


FIGURA 4.26 – Sítio amostrado em área de recuperação. (a) ponto sobre a imagem da última data; e (b) diagrama do transecto em caatinga arbórea-arbustiva.

O conjunto de pixels pertinentes ao transecto 2 e sua vizinhança (FIGURA 4.26a) mostra-se homogêneo radiometricamente na imagem. Isto confere certa confiabilidade na amostra a ser utilizada para esse processo de rotação e fatiamento digital, pois os pixels vizinhos têm uma condição radiométrica similar ao pixel da amostra, que nos permite inferir uma mesma correspondência temática entre eles, conforme a rotulação estabelecida com as informações de campo. A partir da diagramação da estrutura horizontal e vertical da caatinga arbórea amostrada (*transecto 2*), não se observa nenhum elemento no camada superior do estrato arbóreo que é indicativo de estar havendo na área um processo de recuperação. A presença de indivíduos de Imburana (*Bursera leptophloeos*) e Favela de tinguí (*Mascagnia cartácea*) nas camadas média e inferior do estrato arbóreo, além de um estrato arbustivo com alta dominância de marmeleiro (*Croton sonderianus*) e quebra faca (*Cróton sp.*), reforçam o conceito de recuperação. Desta forma, pode-se aceitar tal sítio rotulado como possuidor de uma boa confiabilidade, para uso no controle das técnicas de detecção de mudanças, sendo um perfeito exemplo de recuperação, cujo grau vai depender do espaço de tempo que se queira avaliar.

Na Figura 4.27 é apresentado um diagrama *boxplot* da variância radiométrica de todos os transectos amostrados, o qual foi usado como critério para estabelecer a confiabilidade dos pontos amostrados a serem empregados na aplicabilidade das técnicas de detecção.

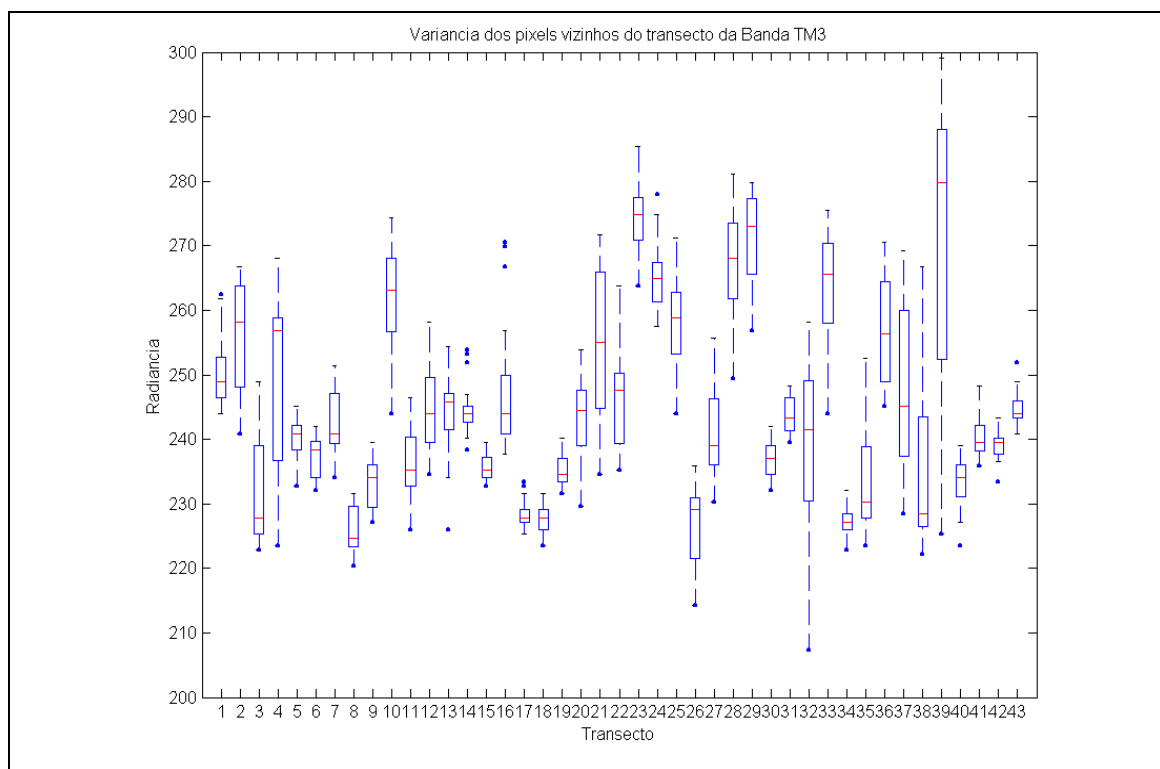


FIGURA 4.27 - Boxplot da variância dos pixels vizinhos do ponto amostrado por transectos.

Na Figura 4.27 os pontos de maior variância são os de menor confiabilidade radiométrica, não sendo aconselhado seu uso para o controle das técnicas de detecção de mudanças. Este tipo de análise conjunta, da confiabilidade radiométrica e da rotulação temática, fornece uma descrição qualitativa das amostras, que pode garantir uma boa acurácia dos mapas de mudanças derivados das técnicas de detecção por rotação radiométrica controlada, as quais serão apresentadas no próximo Capítulo.

4.4. Conclusões e Recomendações

A grande extensão da área abrangida pelas imagens orbitais exige um esforço adicional de planejamento da campanha de campo e adoção de técnicas adequadas para cumprir com os objetivos. A discussão metodológica tratada neste Capítulo mostrou a possibilidade de adquirir informações confiáveis da região de Quixaba, através de: um delineamento amostral não aleatório seletivo; de uma técnica adaptativa para a

amostragem de cada sítio; e uma rotulação baseada na análise de indicadores de processos (recuperação e degradação) observados em campo, em associação com uma orientação através de um modelo sucessional de segundo grau, particularmente desenvolvido para essa região do semi-árido.

A metodologia de coleta de dados de campo foi eficiente para caracterização dos descritores da paisagem e dos processos que neles atuam, permitindo uma confiabilidade na rotulação dos sítios amostrados. A escolha de *transectos*, descrições fitofisionômicas simples e de pontos observacionais, forma um conjunto de técnicas suficientemente capazes de auxiliar esse processo de entendimento temático e de confiabilidade da rotulação, independente da complexidade do sítio.

Como essa confiabilidade está formada por uma componente temática e outra radiométrica advinda da imagem TM\Landsat, conforme exemplificado neste Capítulo, recomenda-se que esta última componente citada seja melhor investigada, para verificar a possibilidade da obtenção desses dados radiométricos a partir de ambas as imagens referentes ao período de análise das mudanças. Isto poderia, com apoio das técnicas ora empregadas no levantamento de campo, melhorar ainda mais o controle da rotação das técnicas RCEN e RCIA no espaço de atributos radiométricos multitemporais. É conveniente lembrar que a componente radiométrica de cada sítio foi extraída de uma imagem em única data, a mais recente, convenientemente apoiada por informações do levantamento de campo.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DESENVOLVIDAS PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS

5.1. Introdução

Nesta fase do trabalho de tese está sendo apresentado o estado da arte do desenvolvimento de duas técnicas novas. Estas foram concebidas para ser aplicadas na detecção de mudanças na cobertura vegetal do semi-árido, cujos resultados preliminares podem ser observados em Maldonado et al. (2001a,b). As técnicas são referidas como Rotação controlada por eixo de não mudança (RCEN) e Rotação controlada por índice de acurácia (RCIA). Atualmente estão sendo integradas com o uso do software específico Sistema de rotação radiométrica de imagens (SIREI). Isso permite automatizar o processamento conjunto da informação derivada das imagens digitais com os dados do levantamento de campo.

As duas técnicas utilizam uma rotação radiométrica de imagens no modo radiância de duas datas da mesma faixa espectral. No caso específico da região do semi-árido, o procedimento de rotação deve ser feito com a banda espectral do vermelho como assinalado por Chavez e Mackinon (1994). Dessa forma as imagens podem expressar valores digitais de mudanças através de um modelo de rotação radiométrica, cuja teoria está apresentada no Capítulo I.

Após a detecção, as imagens são fatiadas e rotuladas para gerar mapas temáticos de mudanças na paisagem. Esta etapa de limiarização pode estar baseada em parâmetros estatísticos (média e variância) da imagem detecção. Entretanto, numa outra abordagem, esta limiarização pode ser realizada a partir dos parâmetros de agrupamento de classes oriundos dos pixels amostrados em campo. Isso, em algumas situações, produz resultados satisfatórios quanto acurácia dos mapas de mudanças. De uma maneira genérica, na metodologia de detecção de mudanças desenvolvida no presente trabalho, as técnicas de rotação radiométrica, fatiamento, rotulação e cálculo da acurácia dos resultados finais, estão condicionados às informações do levantamento de campo.

5.2. Materiais

Na estrutura organizacional adotada para a aplicação das técnicas de detecção de mudanças, os planos de informação (PIs) do banco de dados de Quixaba-PE, com imagens em modo radiância das datas 1984, 1996, 1999 e 2001, constituíram a base de tratamento. Isso permitiu que as duas técnicas de detecção pudessem ser aplicadas com características similares, ou seja, ambas baseadas na rotação de eixos das mesmas imagens em modo radiância. Entretanto, qualquer diferenciação na acurácia do mapeamento temático é produto das características intrínsecas de cada técnica de detecção.

O *software* no qual foram implementadas as técnicas foi o SIREI - Sistema de rotação radiométrico de imagens e o ATRAN/SIREI - Modulo administrador de *transectos*. Este conjunto de programas foi desenvolvido em Matlab 6.0 Release 12.

5.3. Procedimento Metodológico para a Aplicação das Técnicas Desenvolvidas

As técnicas aplicadas possuem uma base comum nos algoritmos de detecção, que é a rotação da radiometria das imagens no espaço bidimensional formado por duas datas em modo radiância. Porém, por serem metodologicamente diferentes, serão apresentadas em forma separada. A primeira técnica (RCEN), ao tratar imagens multitemporais, faz uso de uma rotação baseada estritamente em amostras de “não mudança”. A segunda técnica (RCIA), tem como suporte as informações das amostras de campo, quer seja de degradação, não mudança ou recuperação.

5.3.1. Aplicação da Técnica de Rotação Controlada por Eixo de Não Mudança (RCEN)

Esta técnica é operacionalmente simples e apropriada quando se conta com uma quantidade estatisticamente adequada de amostras de campo de não mudança, rotuladas em forma confiável. A técnica aplica uma regressão linear da radiometria das amostras para se obter o parâmetro angular da rotação, que condiciona a geração da imagem detecção. Na Figura 5.1 é apresentado o diagrama funcional da técnica RCEN.

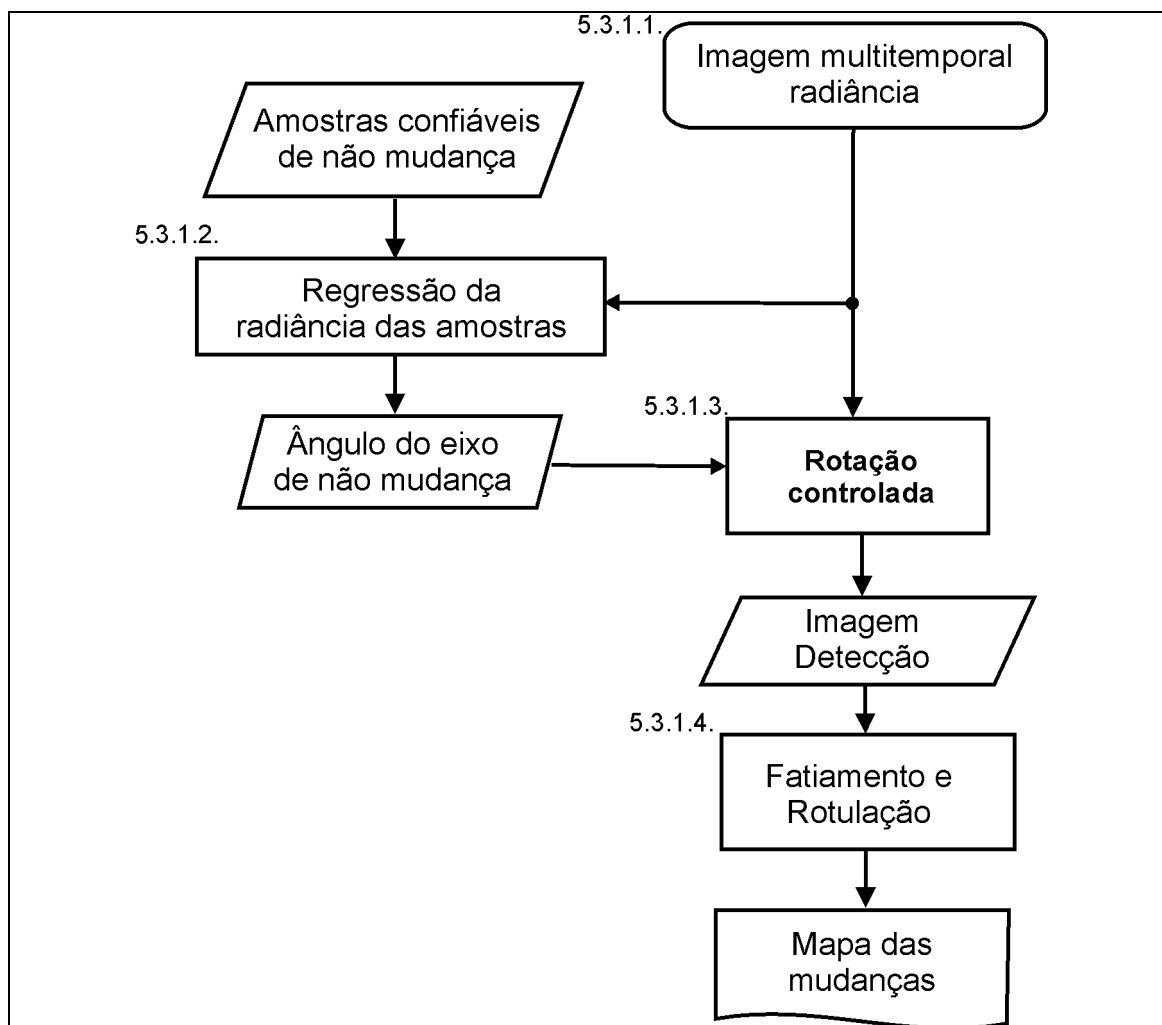


FIGURA 5.1 – Fluxograma explicativo do funcionamento da técnica RCEN.

A seguir são apresentados os sub-processos que compõem a técnica. Estes foram programados no software SIREI para seu funcionamento integrado.

5.3.1.1. Imagem Multitemporal Radiância

Para realizar essa técnica RCEN faz-se uso dos PIs contendo imagens em modo radiância, conforme discutido no item 2.5.1. do Capítulo II. De uma maneira geral, as imagens de satélite possuem diferenças radiométricas derivadas das condições da atmosfera no momento da aquisição. Mesmo trabalhando essas imagens no modo radiância, o efeito aditivo resultante da influência da atmosfera está presente no comportamento espectral do alvo, quando analisado temporalmente. Essa técnica RCEN

minimiza tais efeitos, permitindo a geração de resultados aceitáveis, sobretudo considerando que estes são obtidos a partir de imagens sem correções radiométricas.

5.3.1.2. Regressão da Radiância das Amostras

A partir do posicionamento das amostras de campo sobre as imagens das duas datas, foi extraído o valor de radiância correspondente a cada uma delas. É conveniente registrar que as amostras confiáveis utilizadas para extração da radiância pertencem à categoria temática de não mudança. Esta foi definida no campo por não apresentar nenhum indicador de recuperação ou degradação.

Os valores de radiância dessas amostras, extraídos em duas datas distintas foram relacionados entre si, através da técnica de regressão linear, cujos resultados foram os parâmetros (β_0 e β_1) da reta de regressão citada na Equação 5.1.

$$L\gamma = \beta_0 + \beta_1 L\chi \quad (5.1)$$

sendo:

$L\chi$: valor de radiância na imagem da primeira data

$L\gamma$: valor de radiância na imagem da segunda data

β_0 : ordenada à origem ou “interseção y”

β_1 : tangente do ângulo α do eixo de não mudança

É de conhecimento que o controle dos parâmetros internos destas técnicas digitais de detecção é realizado através do ângulo de rotação (α). No presente caso, este ângulo foi obtido do arco-tangente da inclinação do eixo de não mudança na regressão, como se apresenta a seguir no procedimento de rotação de imagens.

5.3.1.3. Rotação Controlada

Uma vez definidos os parâmetros da rotação na Equação 5.1 e calculado o ângulo segundo a Equação 5.2, foi aplicado o algoritmo rotacional da Equação 5.3, para a geração da imagem detecção.

$$\alpha = \arctg \beta_1 \quad (5.2)$$

$$I_{Det} = -Data_1 \sen \alpha + Data_2 \cos \alpha \quad (5.3)$$

sendo:

I_{Det} : a imagem detecção de mudanças

$Data_1$: banda do vermelho da primeira data

$Data_2$: banda do vermelho da segunda data

$\text{sen } \alpha$: seno do ângulo de rotação

$\text{cos } \alpha$: co-seno do ângulo de rotação

A imagem assim obtida expressa de maneira radiométrica as mudanças na cobertura vegetal. Essa imagem detecção está formada por valores contínuos, onde os tons claros representam os pixels que sofreram maior perda da cobertura vegetal e os tons escuros aqueles de maior ganho.

5.3.1.4. Fatiamento e Rotulação

Nesta operação a imagem detecção, em modo contínuo, foi transformada numa imagem temática. Para isto, a imagem detecção obtida após a rotação foi fatiada e rotulada. Estes são passos independentes ao controle da rotação. O fatiamento e rotulação foram feitos em cinco classes: duas de degradação, uma de não mudança, e duas de recuperação. O fatiamento assim considerado foi obtido pela aplicação conjunta de quatro limiares. A posição destes foi calculada, tendo como base a radiância das amostras de cada classe extraída da imagem detecção. Estes cálculos foram feitos utilizando a técnica de limiarização por agrupamento de amostras, conforme expressado nas Equações 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7. Esses limiares definem os intervalos temáticos, entre os variados níveis de mudanças, necessários para obter a imagem temática:

$$\text{Limiar}_{Dm - Df} = \frac{1}{2} \left(\left(\bar{\chi}_{Dm} + \sigma_{Dm} \right) + \left(\bar{\chi}_{Df} - \sigma_{Df} \right) \right) \quad (5.4)$$

$$\text{Limiar}_{Nm - Dm} = \frac{1}{2} \left(\left(\bar{\chi}_{Nm} + \sigma_{Nm} \right) + \left(\bar{\chi}_{Dm} - \sigma_{Dm} \right) \right) \quad (5.5)$$

$$\text{Limiar}_{Rm - Nm} = \frac{1}{2} \left(\left(\bar{\chi}_{Rm} + \sigma_{Rm} \right) + \left(\bar{\chi}_{Nm} - \sigma_{Nm} \right) \right) \quad (5.6)$$

$$\text{Limiar}_{Rf - Rm} = \frac{1}{2} \left(\left(\bar{\chi}_{Rf} + \sigma_{Rf} \right) + \left(\bar{\chi}_{Rm} - \sigma_{Rm} \right) \right) \quad (5.7)$$

onde a classe a que pertence cada parâmetro é indicada pelo sub-índice:

N_m : Não mudança

R_f : Classe recuperação forte

R_m : classe recuperação média

D_f : Classe degradação forte

D_m : classe degradação média

sendo os parâmetros calculados:

$\text{Limiar}_{D_m-D_f}$: posição do limiar entre as classes degradação média e forte

$\text{Limiar}_{N_m-D_m}$: posição do limiar entre as classes não mudança e degradação

$\text{Limiar}_{R_m-N_m}$ média

$\text{Limiar}_{R_f-R_m}$: posição do limiar entre as classes não mudança e recuperação

$\bar{\chi}$ média

σ : posição do limiar entre as classes recuperação forte e média

: média da distribuição normal das amostras de uma classe

: desvio padrão das amostras de uma classe

O agrupamento das amostras forneceu a estatística de posição de cada grupo. Desta forma a posição dos limiares foi definida como promédio entre a soma do desvio padrão e média de cada grupo (Equações 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7). Graficamente o cálculo das posições dos limiares na imagem detecção pode ser apresentado como na Figura 5.2.

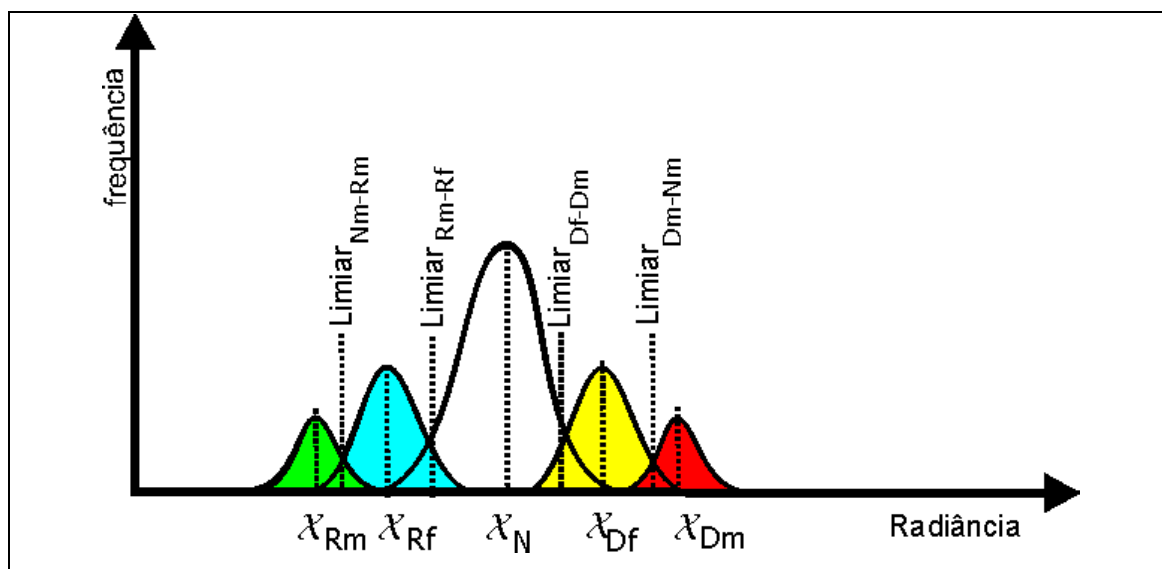


FIGURA 5.2 – Distribuição da radiância dos grupos de amostras na imagem detecção.

Quando as amostras de alguma das classes não são suficientes para obter grupos representativos, a limiarização pode ser completada de acordo com a simetria do comportamento radiométrico relativo à classe de não mudanças. Assim, a posição dos limiares de recuperação pode ser determinada através da posição do limiar simétrico da classe oposta de degradação. Esta distância de limiarização já foi considerada em Maldonado et al. (2002) como indicadora de intensidade de mudança e chamada de: “distância ao eixo de não mudança indicativa de degradação e recuperação”. Desta forma a imagem temática possui 5 classes, como produto da aplicação dos 4 limiares. Uma classe central como não mudança, duas classes que agrupam pixels de radiância com valores maiores de degradação e duas outras classes que categorizem valores de recuperação.

5.3.2. Aplicação da Técnica de Rotação Controlada por Índice de Acurácia (RCIA)

Esta técnica de detecção de mudanças RCIA caracteriza-se pela integração, em um algoritmo iterativo, dos processos de rotação radiométrica, levantamento de campo, fatiamento, rotulação e cálculo da acurácia do mapeamento. Esta técnica somente pode ser aplicada satisfatoriamente através de um programa computacional. Neste caso foram

programados os processos em Matlab 6.0 Release 12. Este conjunto de programas estão incorporados ao programa SIREI. A detecção de mudanças se produz através da geração automática de matrizes de confusão, partindo-se dos mapas de mudanças geradas internamente e dados obtidos no levantamento de campo. Estas matrizes são geradas de forma automática e iterativamente comparadas entre si, até conseguir a de melhor acurácia temática, como apresentado no fluxograma da Figura 5.3.

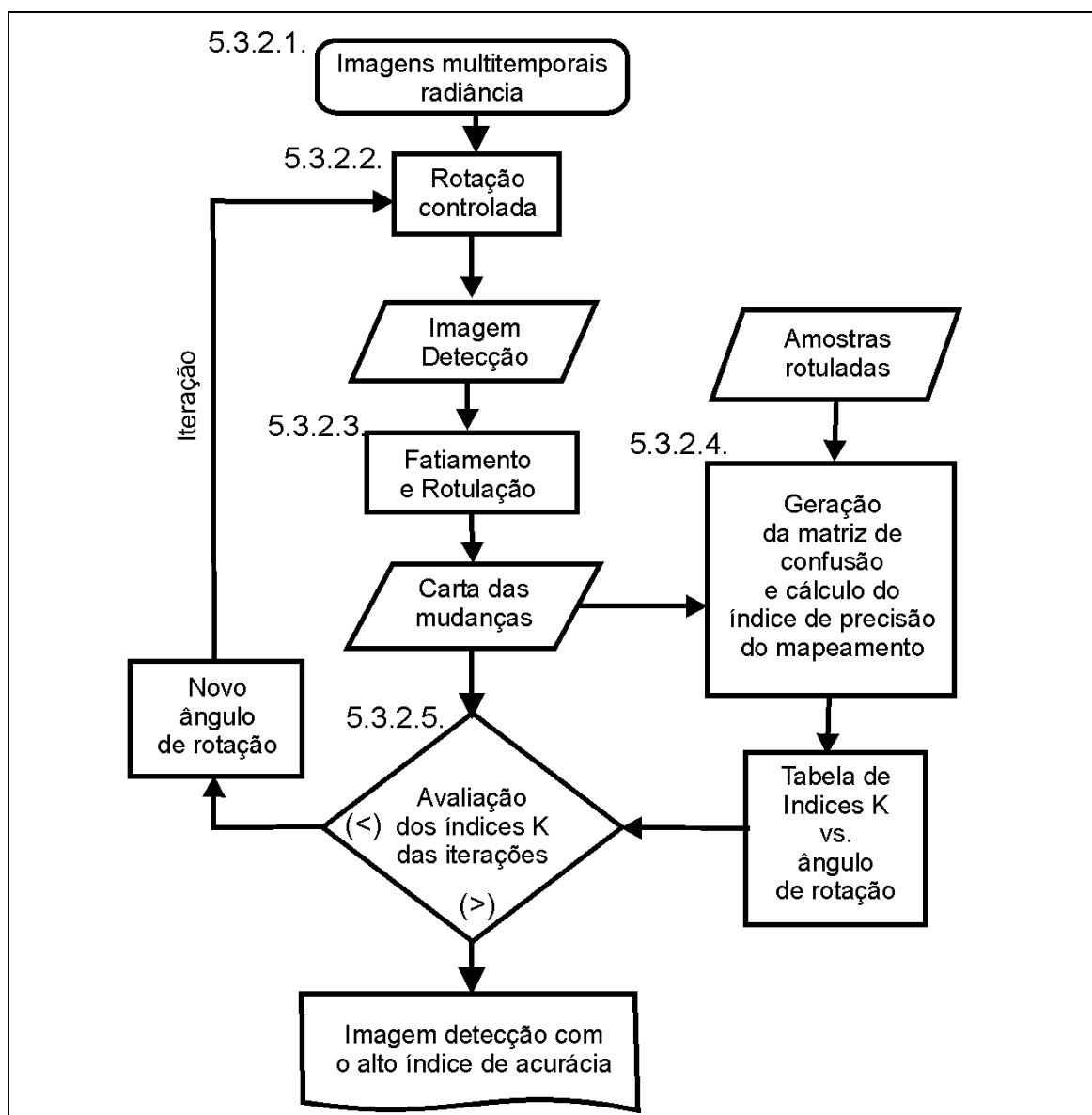


FIGURA 5.3 - Fluxograma de funcionamento da RCIA.

O controle desta técnica se origina na análise automática da matriz de erro, conforme proposto em Maldonado et al. (2001a). Este é centrado numa rotação radiométrica análoga à RCEN, porém controlada pela informação de campo através da análise automática da matriz de confusão. A seguir são detalhados os passos do fluxograma da Figura 5.3.

5.3.2.1. Imagens Multitemporais em Radiância

A técnica RCIA faz uso dos PIs do banco de dados que contem as imagens em modo radiância. Estes Pis são os mesmos utilizados pela RCEN, com as imagens formadas por duas bandas correspondentes a duas datas e à mesma região espectral.

5.3.2.2. Rotação Controlada

A rotação RCEN é controlada diretamente pela geração seqüencial de ângulos com intervalos de 0.017 radianos ou meio grau decimal. O sucesso da rotação é medido em cada iteração. A geração da imagem detecção de mudanças é obtida usando os algoritmos simples de uma rotação, sendo α o ângulo de rotação:

$$IDet = - Data1 * \sin \alpha + Data2 * \cos \alpha \quad (2^{da} \text{ Componente ou Imagem detecção}) \quad (5.8)$$

Assim, após esta rotação, a imagem detecção é fatiada e rotulada, segundo limiares pré-definidos. Outra das grande diferença entre a RCIA e RCEN, além da forma de cálculo do ângulo de rotação, é a localização do fatiamento e rotulação dentro do fluxograma da técnica. Na RCIA estas operações são feitas internamente de forma automática, como parte das iterações (repetições) para obter os índices de acurácia que permitem selecionar o melhor resultado. Por sua vez, na RCEN o fatiamento e rotulação são parte de etapa final de geração do mapa de mudanças.

5.3.2.3. Fatiamento e Rotulação

Este processo converte a imagem detecção do modo contínuo ao temático, sendo que esta conversão automática forma parte da rotina iterativa do RCIA. Neste processo são calculados os limiares na mesma forma da RCEN e as imagens contínuas são fatiadas e rotuladas para gerar um mapa de mudanças. A rotulação é idêntica à aplicada para

RCEN no ponto anterior. Os resultados destas sub-rotinas são mapas de detecção de mudanças, associadas aos ângulos definidos para cada iteração.

Como a operação é automática, a RCIA não pode funcionar sem número suficientes de amostras para todas as classes. Quando o intervalo de tempo entre imagens é pequeno, a dificuldade para obter amostras de recuperação torna-se muito grande. Por isso, esta técnica geralmente não é aplicável nas imagens da época seca da região semi-árida, sobretudo quando se deseja fazer um monitoramento intra-anual.

5.3.2.4. Geração da Matriz de Confusão e Cálculo do Índice de Acurácia do Mapeamento

A técnica da RCIA necessita avaliar internamente a qualidade dos resultados obtidos em cada iteração. Isso é feito através de um índice quantitativo extraído da matriz de confusão. Congalton e Green (1999) assinala que a matriz de confusão é uma forma efetiva de obter a acurácia de um mapa. Esses resultados são obtidos analiticamente através de um índice baseado na diagonal principal da matriz de confusão. Isso gera uma medida de concordância entre os dados reais e da classificação, representados na diagonal principal da matriz de confusão.

O índice K reflete a acurácia total do mapa gerado e para construir a matriz são utilizadas as amostras de campo rotuladas e os pixels rotulados correspondentes ao mapa de mudanças gerada em cada iteração. A matriz de confusão é gerada automaticamente através da comparação dos rótulos das amostras de campo e dos rótulos correspondentes no mapa de detecção de mudanças. Isso gera um arranjo de números em colunas e linhas que expressam o número de unidades pertencentes a uma determinada classe caracterizada pelo levantamento de campo e pela detecção digital.

O índice de acurácia utilizado é calculado segundo os algoritmos da análise Kappa, apresentados em Congalton (1991). A presente análise utilizou este índice para estimar de forma automatizada a acurácia do mapeamento, através do cruzamento das imagens com os planos resultantes dos dados do levantamento de campo.

5.3.2.5. Avaliação dos Índices K das Iterações

Esta é uma rotina de controle do fluxo das iterações. O seu objetivo é selecionar a detecção de mudanças ótima. Para isso utiliza a simples comparação entre os índices de acurácia do mapa gerado num determinado nível de iteração e do mapa gerado na iteração anterior. A iteração inicial aplica um ângulo determinado empiricamente, geralmente de 20° graus. Para o caso da região semi-árida, este ângulo pode ser menor em função da combinação de imagens utilizadas. Em geral, nas primeiras iterações o índice K aumenta rapidamente até atingir um máximo quando o ângulo se aproxima de 45°. Isso ocorre de acordo com o grau de semelhança entre as condições da atmosfera durante a aquisição da cena em cada data, como já foi discutido na fundamentação teórica da rotação controlada. Porém, o ângulo ótimo pode ser muito diferente, face à atuação de vários fatores além dos atmosféricos. Para finalizar o processo de seleção da detecção ótima, o índice obtido deve ser menor que o obtido na iteração anterior. Assim, o fluxo das iterações é interrompido e o mapa de detecção final será o gerado como resultante da iteração anterior.

5.4. Resultados e Discussão

Apresenta-se em primeiro lugar, os resultados da RCEN ordenados pelo intervalo de detecção entre imagens, e posteriormente o resultado da RCIA.

5.4.1. Resultados da RCEN

Na Figura 5.4 apresenta-se a janela do programa SIREI com o modelo analítico que gerou o ângulo de rotação da RCEN para o período de 17 anos, (1984 / 2001) na região de Quixaba.

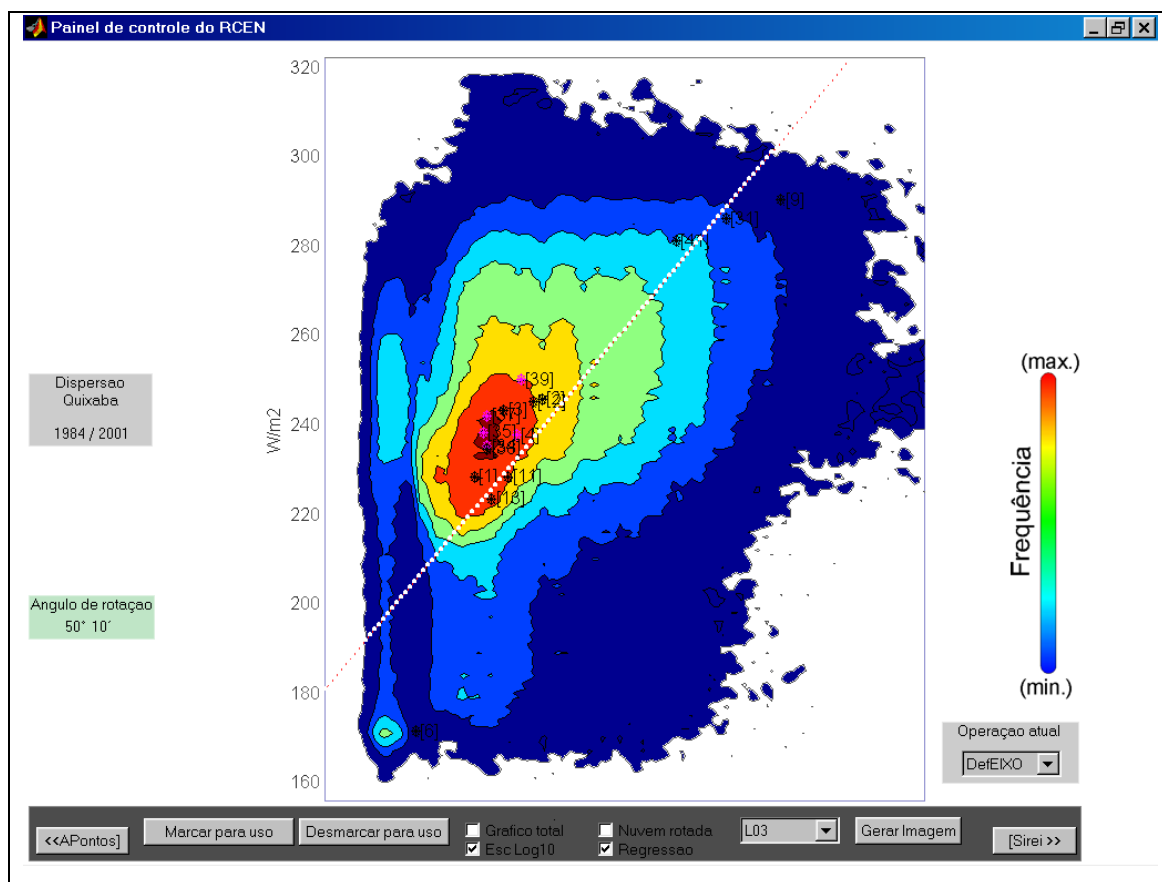


FIGURA 5.4 – Painel de controle para definição do eixo de não mudança para as imagens TM3/ETM3 do intervalo 1984/2001.

O ângulo de rotação maior que 45° indica que a segunda data possui maior efeito atmosférico que a primeira data. Observam-se os grupos de pixels das sombras, próximo ao eixo de coordenadas da segunda data. O mapa de mudanças da RCEN está apresentado na Figura 5.5. Nesta não se observa simetria nas proporções entre classes de degradação e recuperação. A acurácia aceitável melhorou muito em relação às obtidas pelas técnicas de referência.

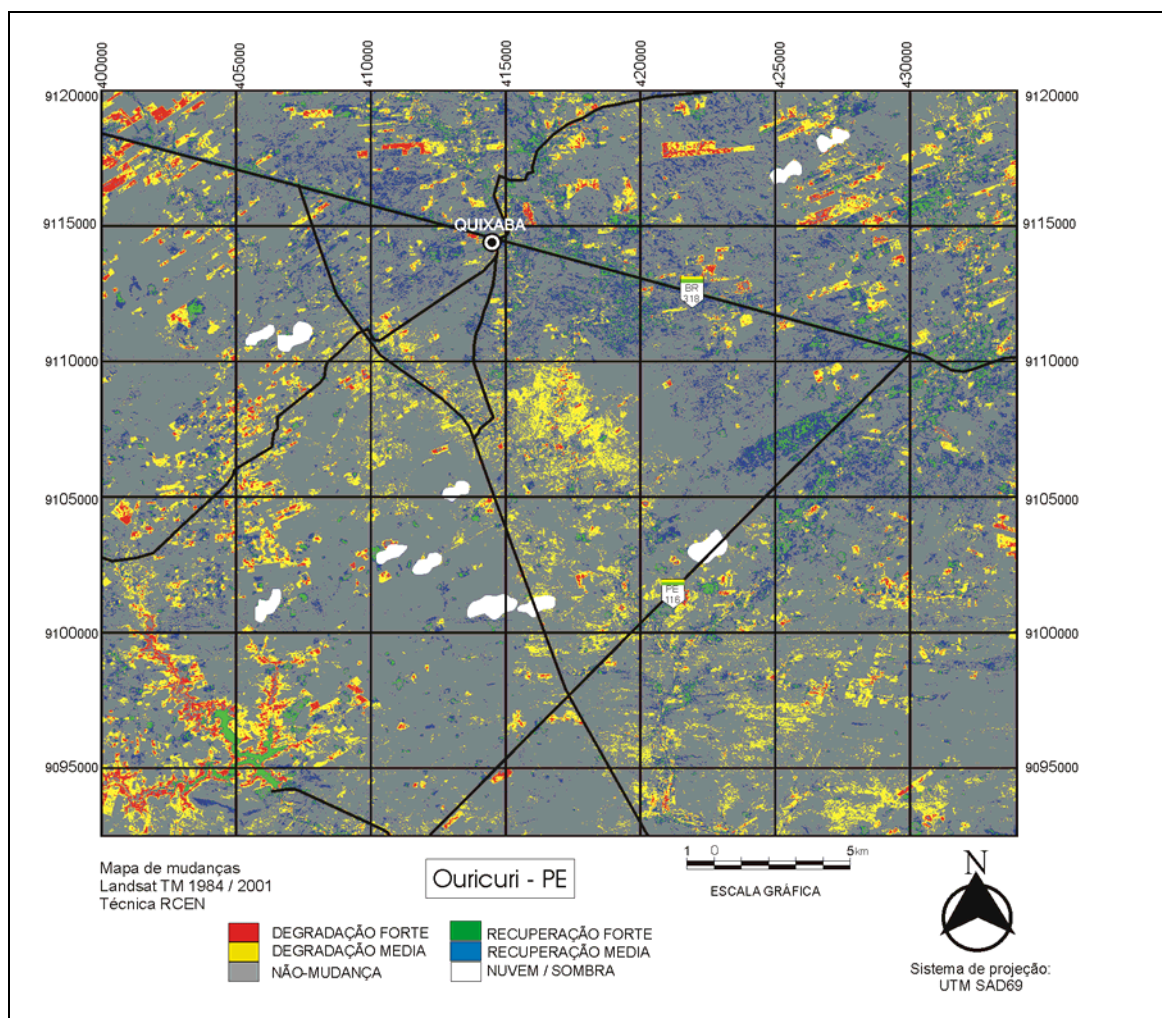


FIGURA 5.5 - Mapa das mudanças RCEN 1984/2001.

Neste mapa temático, a equidade das proporções em área entre classes é esperada. Isso porque a imagem está composta por áreas sendo degradadas e outras em recuperação. A grande parte das terras de baixo valor econômico, como aquelas de planossolos na área central do mapa, vem sendo utilizadas pela pecuária extensiva, encontrando-se em equilíbrio relativo entre uso e abandono. Na Figura 5.6 é mostrado o dispersograma do intervalo das imagem 1996/2001, cujo diagrama tem menor dispersão em comparação ao intervalo 1984/2001, portanto possui maior proporção de pixels de não mudanças ou próximos ao eixo de não mudança. Nota-se ainda na Figura 5.6 que o ângulo formado pela reta de regressão das amostras de não mudança está mais próximo a 45°, o que indica que o efeito atmosférico possui magnitude similar nas duas datas.

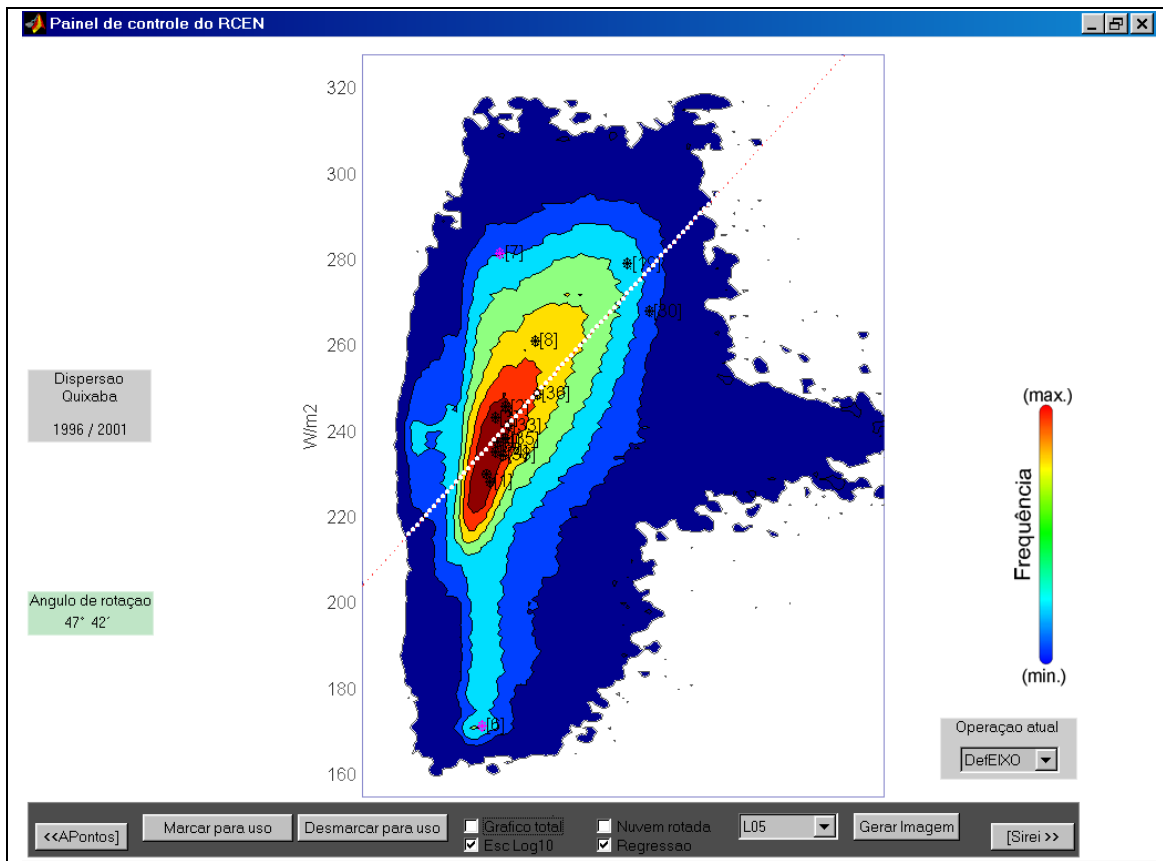


FIGURA 5.6 - Painel de controle da definição do eixo de não mudança para o intervalo 1996/2001.

Na Figura 5.7 é mostrada o mapa de detecção de mudanças 1996/2001 obtida com a técnica RCEN.

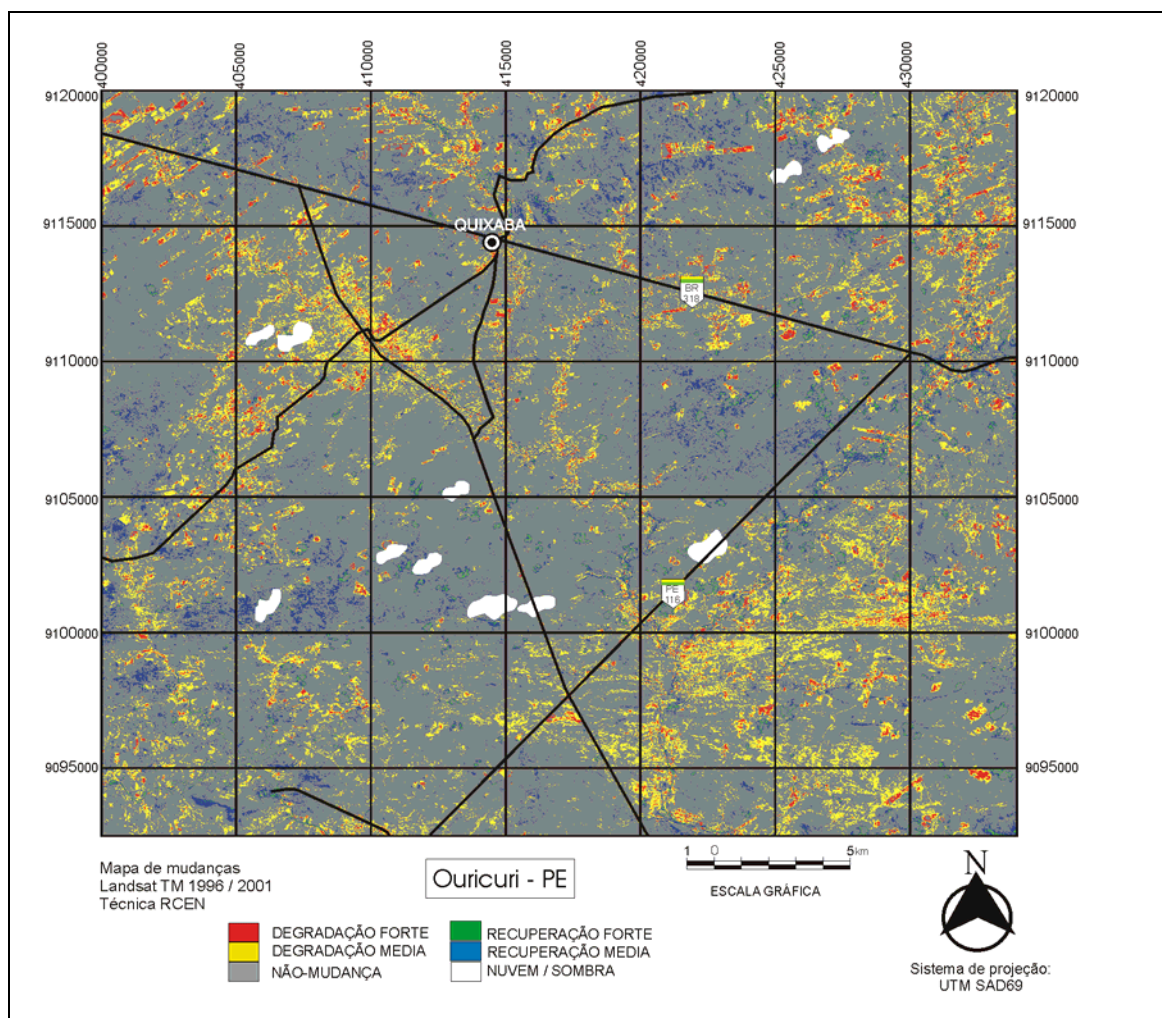


FIGURA 5.7- Mapa de mudanças RCEN 1996/2001

Nesta imagem detecção, a proporção das áreas em recuperação é menor que as de degradação. A limiarização por agrupamento de amostras ajustou-se melhor à pouca superfície em recuperação. O ângulo de rotação foi próximo ao da ACP, cuja principal diferença com os resultados desta técnica é causada pelo fatiamento simétrico da técnica de referência.

A degradação média (amarelo) encontra-se principalmente próximo ao povoado de Coxo, no noroeste do mapa. Nesta área estava se produzindo um ciclo de recuperação antigo, que foi interrompido com a ativação da adutora de água, o que favoreceu um aumento da atividade antrópica na área. Isso pode ser observado na análise da imagem de detecção para o intervalo de 17 anos, pois a área estava rotulada como não mudança.

Contudo, registra-se que no decorrer deste intervalo de 17 houve um pico de recuperação, somente detectado nesse intervalo menor (5 anos).

Na área de potencial agrícola com solos férteis e que corresponde às vizinhanças da drenagem, observam-se alternâncias de recuperação e degradação conforme à complexidade da paisagem (uso e cobertura da terra). Esta pode apresentar culturas, pousio, complexos arbóreos, currais, casas, etc. Todavia, em área de planossolos não há mudança nos mapas temáticos para todos os intervalos de tempo entre imagens. Esta é uma área de baixa fertilidade, chamada localmente de “clima de tabuleiro” e que está formada por um abundante estrato herbáceo de bromeliáceas (caroá e macambira).

Na Figura 5.8 é apresentado o dispersograma da imagem detecção do intervalo menor 1999/2001. Nota-se a pouca dispersão em relação ao eixo de não mudança. À direita do eixo se encontram os pixels de recuperação e acima, à esquerda, os de degradação. O intervalo de tempo curto na análise não permite a ocorrência de muita recuperação evidenciando na forma da dispersão.

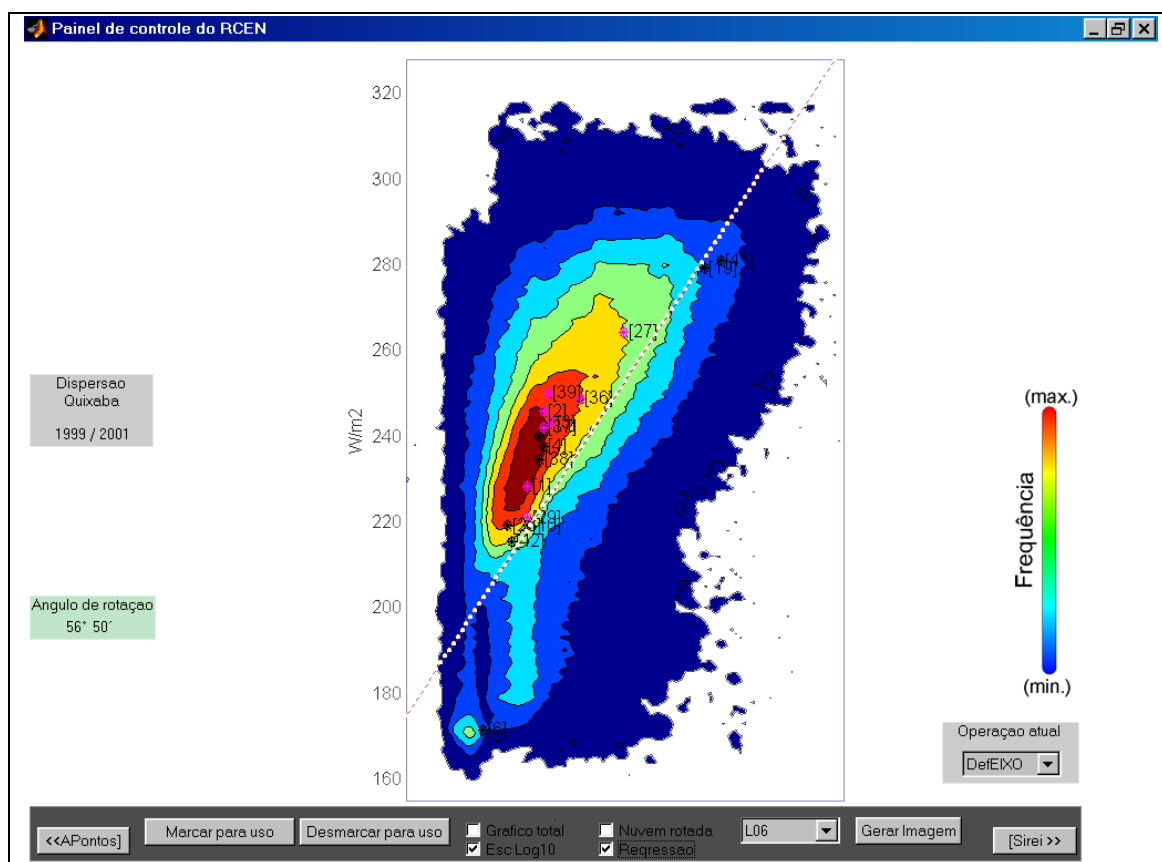


FIGURA 5.8 - Painel de controle da definição do eixo de não mudança para o intervalo entre as imagens 1999/2001.

Neste caso, o ângulo de rotação foi de $56^{\circ} 50'$ enquanto que para a ACP, discutida no Capítulo IV, foi de 38° para o mesmo intervalo. Esta diferença é produto do efeito das nuvens sobre as estatísticas da imagem. Na Figura 5.9 é mostrado o mapa resultante deste processo rotacional.

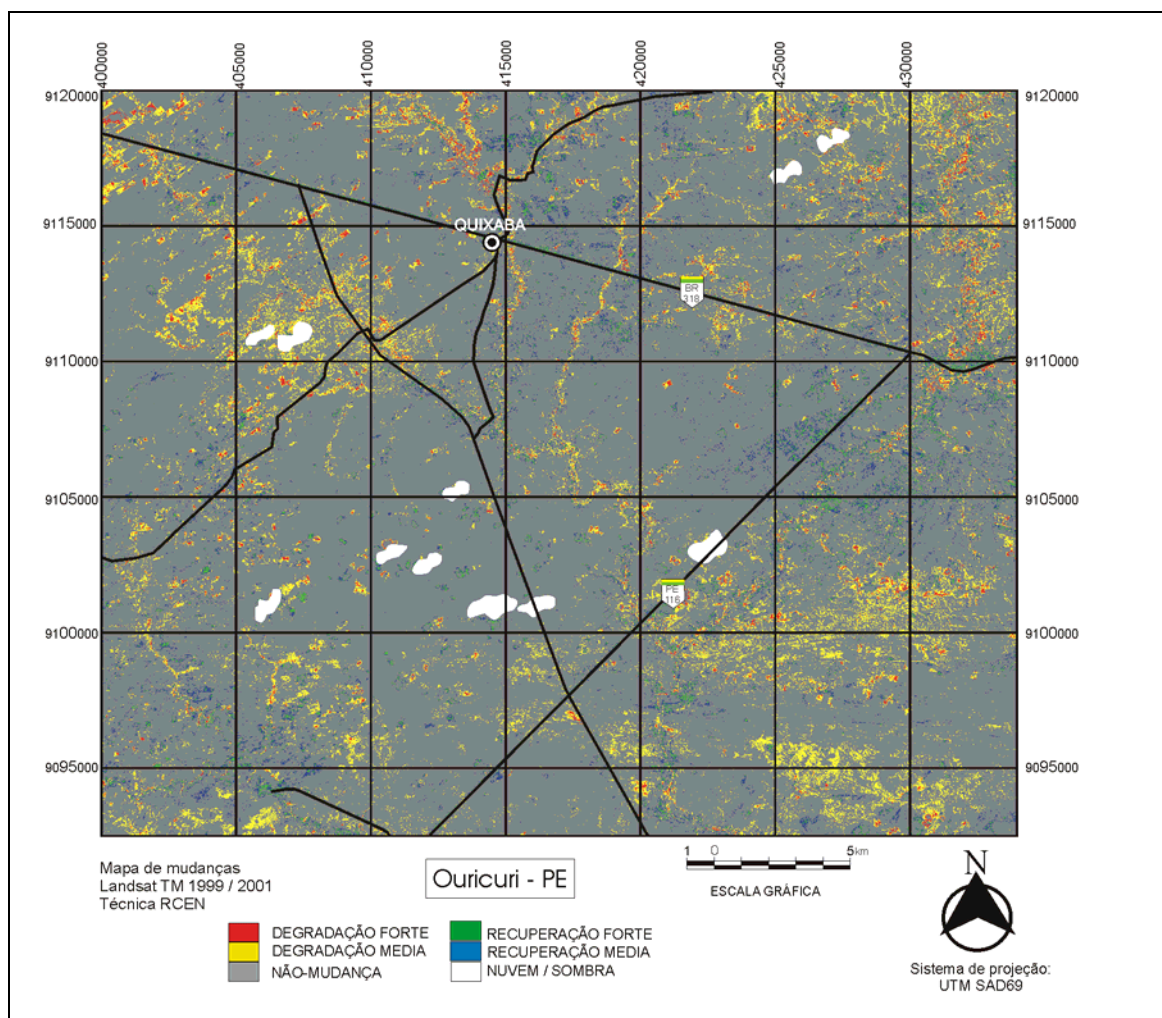


FIGURA 5.9 - Mapa de mudanças RCEN 1999/2001

Outra das razões para a discrepância entre os desempenhos da ACP e da RCEN foi o fatiamento estatístico. Este fatiamento na ACP está baseado simplesmente em parâmetros estatísticos de posição, o que geralmente não corresponde com a realidade no campo. A proporção de recuperação da cobertura vegetal diminuiu com a diminuição do tempo entre imagens, estando a proporção de degradação relacionada com a atividade antrópica ocorrida no período entre imagens. Por estas razões, rotação controlada e fatiamento por agrupamento de amostras, o resultado da ACP foi de baixa qualidade, enquanto da RCEN foi muito melhor. O mapa de mudanças RCEN somente apresentou recuperação forte em alguns açudes cujo nível de água aumentou neste

intervalo de tempo. Os resultados da RCEN foram consistentes e a técnica manteve um desempenho aceitável.

5.4.2. Mapas de Mudanças da RCIA

A técnica não conseguiu gerar imagens detecção para dois dos períodos testados, correspondentes àqueles de menor intervalo multitemporal. Isso ocorreu, possivelmente, por falta de amostras confiáveis das classes de recuperação nas imagens do intervalo de dois e cinco anos; no primeiro, a classe recuperação forte não foi encontrada, e no segundo, foi pouco freqüente. Nos dois casos a técnica gerou resultados inaceitáveis, que foram descartados. Isso ocorreu pelo mau funcionamento da rotação por falta de amostras, ficando o processo de fatiamento mais afetado. Esta técnica somente apresentou resultados aceitáveis com o intervalo de 17 anos entre imagens. Na Figura 5.10 mostra-se a evolução dos histogramas das imagens intermédias obtidas internamente nas iterações da RCIA, considerando-se a análise multitemporal nesse intervalo de tempo.

Na Figura 5.10 é apresentado um histograma dos valores da radiância transformada (rotacional), contida nas várias imagens detecção geradas internamente na RCIA. Este histograma é apresentado conjuntamente com o índice K de funcionamento da técnica ao longo da rotação. As mudanças na forma do histograma da imagem detecção estão relacionadas com o aumento do índice K, até determinado patamar, que paralisa o processo rotacional numa condição satisfatória. No ângulo de rotação ótimo, onde a imagem possui máximo índice K, o histograma apresenta uma forma simétrica, cuja moda é a mediana da classe de não mudança.

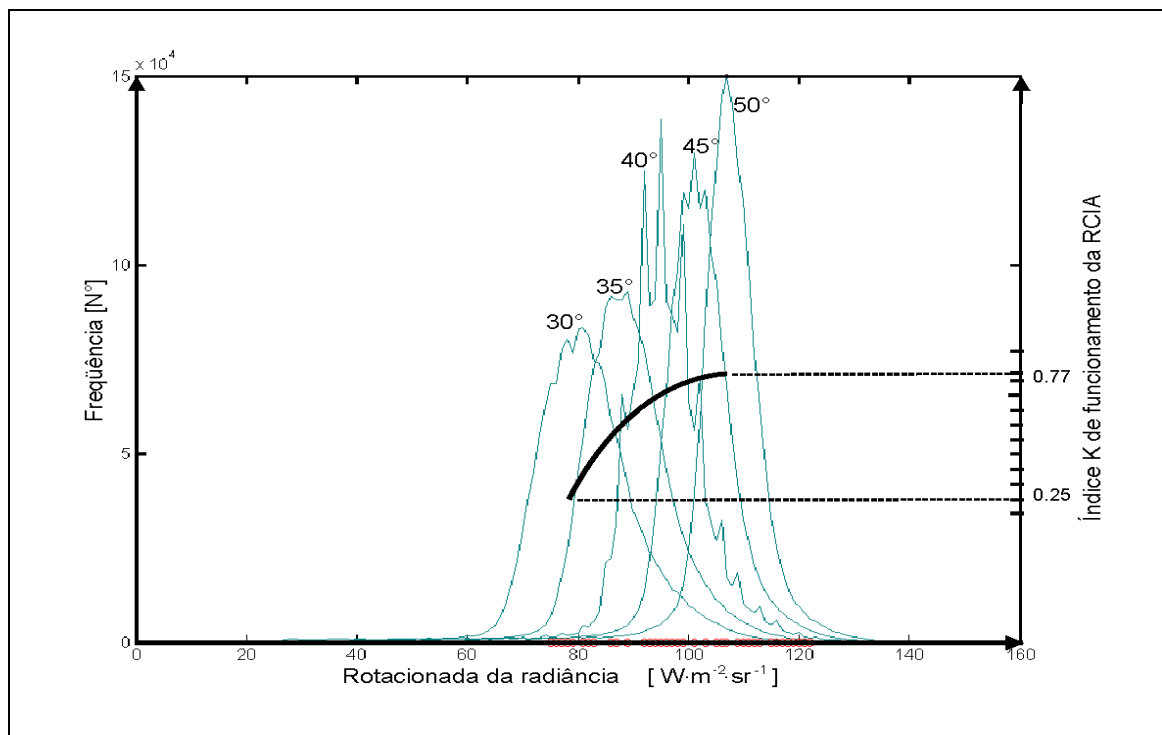


FIGURA 5.10 - Evolução da forma do histograma da imagem detecção e dos valores índice K ao longo da rotação da RCIA.

Finalmente, o mapa de detecção de mudanças (FIGURA 5.11) foi obtido mediante um ângulo de rotação de $48^{\circ} 30'$, e uma acurácia muito boa.

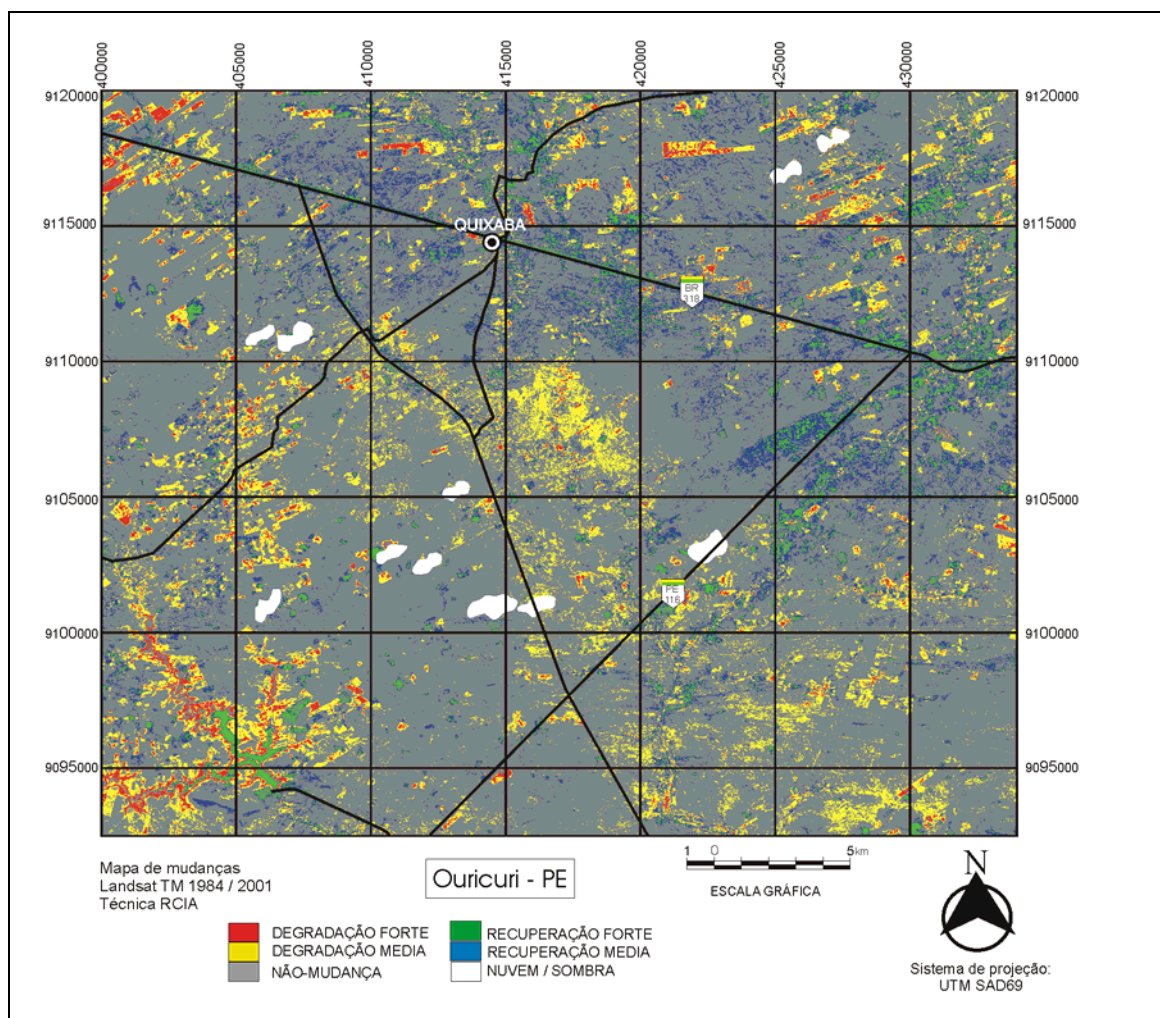


FIGURA 5.11 - Mapa de mudanças RCIA 1984/2001

Nessa Figura 5.11 aprecia-se a extensão aproximadamente igual entre as classes de degradação e recuperação, como consequência do aumento da simetria do histograma oriundo do processo rotacional. A alteração da forma do histograma, da imagem detecção, modifica também as posições dos limiares (descritos no item 5.3.1.4, deste Capítulo) quando estas são dependentes da extração da radiância da imagem. Isso ocorre no transcurso da rotação onde as classes de não mudança separam-se das de mudanças, aumentando paulatinamente a acurácia da detecção. Quando se aplica um ângulo maior que o ótimo, as amostras de não mudança misturam-se novamente às de mudanças. É nesse ponto que a técnica detém as iterações e escolhe o mapa de detecção que obteve o melhor índice de acurácia na análise Kappa.

5.5. Conclusões e Recomendações

A RCEN foi consistente na obtenção dos índices de acurácia moderada à boa, conforme a categorização de Landis e Koch (1977), com qualquer dos intervalos de tempo para a região do semi-árido investigada. Esta técnica pode ser muito útil, sobretudo quando se trata de operacionalizar um sistema de monitoramento simples, que empregue imagens de variados intervalos, até mesmo anuais. Por sua vez, a técnica de RCIA não foi consistente e deve ser modificada, para uma possível melhoria nos resultados de detecção em intervalos menores. Isso poderia ser talvez obtido, através da aplicação de outro tipo de índice de acurácia, para controlar a rotação quando não existem suficientes amostras de alguma das classes temáticas.

A RCEN pode minimizar o efeito das chuvas na resposta espectral dos alvos, como foi observado tal influência na imagem de 1984, com relação à sazonalidade na cobertura vegetal localizadas sobre parte da imagem da primeira data, o que não apareceu como degradação na detecção de mudanças. Para isto algumas amostras de não mudança foram coletadas nas regiões da imagem afetadas pelas chuvas. Estas amostras deslocam o eixo da rotação para incluir a área afetada no centro do fatiamento (classe não mudança). Muitas vezes, o fenômeno de chuvas localizadas em alguma parte da cena, não é perceptível espacialmente nas imagens. Neste caso, um critério recomendado para a seleção e posicionamento das amostras que suportam a rotação radiométrica, é que estas estejam regularmente distribuídas em toda a imagem.

Outra recomendação surgida a partir do presente trabalho, com a observação e análise do dispersograma da radiometria das imagens multitemporais na banda espectral do vermelho, é de eliminação das nuvens na fase inicial de detecção, definindo assim uma melhor área de radiância sem contaminação, fora da qual os valores correspondem a sombras ou nuvens. Um fato que merece registro é também a possibilidade de eliminação das nuvens nos mapas de mudanças gerados, antes de se efetuar os cálculos de superfície dos temas. Isto oferece vantagens, porque no semi-árido ocorrem freqüentemente nuvens pequenas e baixas, que formam um par nuvem-sombra, que dificulta a interpretabilidade nas imagens. No mapa de mudanças esse par “nuvem-

sombra” torna-se um par categorizado erroneamente como “degradação forte-recuperação forte”, que mascara os cálculos de superfícies de mudanças.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DOS DADOS E SÍNTESE METODOLÓGICA

6.1. Introdução

O objetivo deste Capítulo foi apresentar o procedimento de análise dos dados resultantes da aplicação das quatro técnicas de detecção de mudanças, Diferença simples, ACP, RCEN e RCIA. Uma primeira análise foi a avaliação do desempenho individual de cada técnica, considerando cada intervalo de tempo estudado. Este desempenho simplesmente foi avaliado através de índices específicos para estimação da acurácia como o Índice K tratado por Congalton (1991). A segunda parte foi a análise comparativa do desempenho entre técnicas, para os mesmos intervalos de tempo entre imagens. Algumas das técnicas são eficientes com intervalos de tempo maior, ou quando as cenas apresentam proporções equilibradas de degradação e recuperação e maior proporção de não mudanças, como foi apresentado em Maldonado (1999). Considerando essa premissa, procurou-se investigar nesta fase do procedimento metodológico qual técnica seria mais consistente para estudar a dinâmica de uso e cobertura na região do semi-árido.

6.2. Material e Método

Neste Capítulo os mapas de mudanças testados correspondem àqueles gerados pelas técnicas de detecção: Diferença simples (item 3.3.1), Análise por componentes principais (item 3.3.2), Rotação radiométrica controlada por eixo de não mudança (item 5.4.1) e Rotação controlada por índice de acurácia (item 5.4.1). Estas técnicas geraram os mapas para os intervalos de 17 anos (1984 até 2001), de 5 anos (1996 até 2001) e de 2 anos (1999 até 2001), exceto no caso da técnica RCIA que gerou apenas o mapa de mudanças 1984/2001.

A metodologia para análise está dividida em três procedimentos: o primeiro utiliza a técnica de análise da matriz de confusão; o segundo a análise kappa; e o terceiro, um teste de significância entre matrizes de confusão.

6.2.1. Matriz de Confusão

A matriz de confusão é um arranjo de números em colunas e linhas que expressa o número de unidades identificadas para uma classe particular, por dados de referência e por uma classificação temática. A matriz de erro, segundo Story e Congalton (1986), é uma forma efetiva de representar a acurácia de um mapa, descrevendo as acurácias individuais de cada classe e os erros de comissão e de exclusão. Nesta, os casos de concordância temática entre a referência e o mapeamento encontram-se na diagonal principal (FIGURA 6.1). Este número dividido pelo total de casos é chamada de acurácia total do mapeamento. Desde Anderson (1976), citado por Congalton e Green (1999), tem sido adotado o valor 85% como padrão aceitável para um mapa.

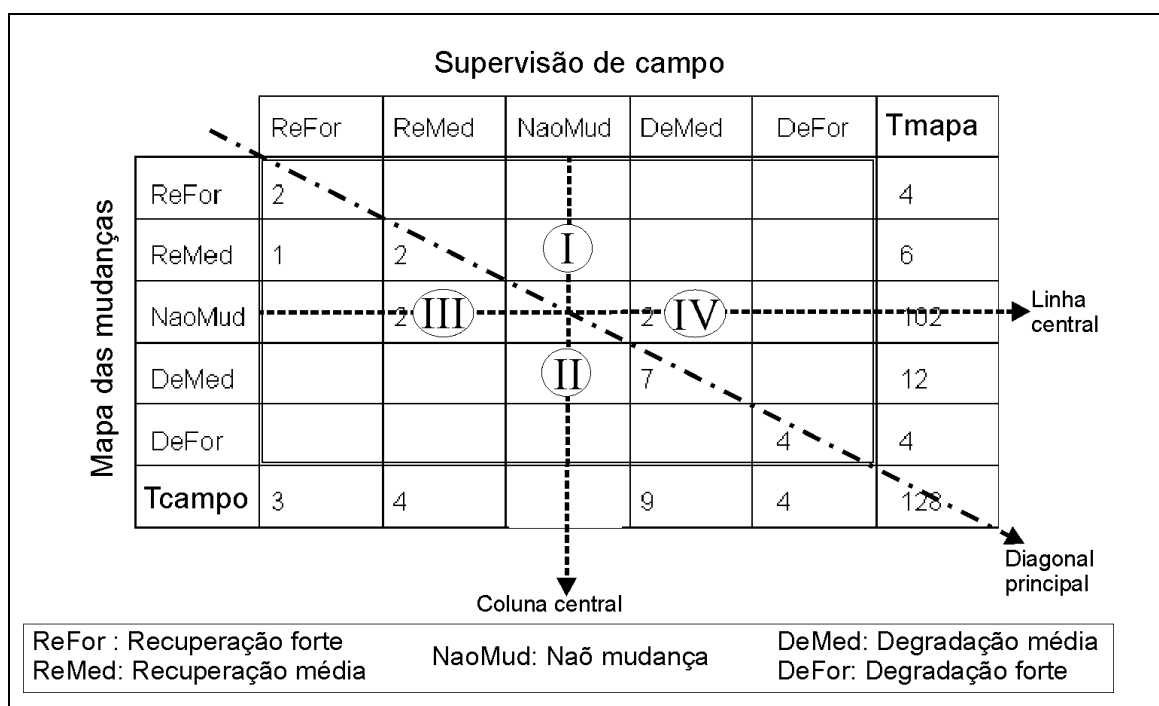


FIGURA 6.1. – Esquema para a análise da matriz de confusão

Como se observa na Figura 6.1, uma das propriedades da matriz de confusão é a de representar todos os casos possíveis de não concordância entre a detecção digital e a verdade de campo. Embora a análise da matriz de confusão esteja centrada na diagonal principal, os valores fora da diagonal podem indicar detalhes sobre o desempenho da técnica de mapeamento utilizada (Congalton e Green, 1999). Como já foi observado em

Maldonado (1999), as relações quantitativas entre os casos de confusão na diagonal principal e coluna central e linha central, podem caracterizar as incertezas no funcionamento da técnica de rotação radiométrica.

Neste ponto, o objetivo da construção da matriz de confusão e sua estratificação espacial foi a avaliação do desempenho das técnicas de detecção através da análise da confusão relativa entre classes de mudanças. A coluna central é formada pelos casos rotulados no campo como não mudança. Esta possui na interseção com a diagonal principal os casos rotulados corretamente no mapa das mudanças. Na célula desta coluna (FIGURA 6.1) que se encontra no setor superior à linha central (I) estão os casos de confusão com recuperação e na célula inferior (II) os casos de confusão com degradação média. A relação entre os casos I e II quando são analisados em relação à cobertura vegetal caracterizam a execução da rotação, como apresentado em Maldonado (1999). Quando o número de casos I for maior do que o de casos II, a rotação aplicada pela RCEN possivelmente foi maior que a rotação ótima. A situação inversa caracteriza uma rotação menor que a considerada ótima. Após aprofundar a análise dos resultados discriminados em sítios de baixa e alta cobertura vegetal, pode-se recomendar uma forma para melhorar a técnica ora desenvolvida, a mediante modificação da rotação, da posição de limiarização da imagem de detecção, ou até mesmo da forma dos limiares no espaço bidimensional da radiometria das imagens.

6.2.2. Análise Kappa da Matriz de Confusão

Esta é uma técnica multivariada discreta, que determina se uma matriz de confusão é significativamente diferente de outra obtida de forma aleatória (Bishop et al., 1975). O objetivo da aplicação desta análise Kappa é obter o parâmetro estatístico K, que é considerado uma medida de concordância entre os dados reais e da classificação (representados na diagonal principal da matriz de confusão) e as ocorrências indicadas nos totais das colunas e linhas. Para qualificar os resultados das técnicas de detecção foi utilizada a informação constante da Tabela 6.1.

TABELA 6.1 - Qualidade das cartas segundo o Índice K.

Qualidade da detecção	K
Acurácia pobre	< 0,40
Acurácia moderada	0,40 – 0,80
Acurácia excelente	0,80 – 1,00

FONTE: Modificada de Landis e Koch (1977).

Diversos autores, entre eles Congalton e Green (1999), consideram inaceitáveis valores de K menores de 0.60, embora reconheçam que este valor deve ser analisado conjuntamente com a variabilidade das classes mapeadas. Na etapa metodológica seguinte os resultados dessa análise Kappa são ainda avaliados através de um teste de significância do ajuste dos dados (teste estatístico Z), como veremos a seguir.

6.2.3. Teste de Significância com Uso da Estatística Z

Este teste determina se o resultado obtido por uma técnica é significativamente melhor que de uma matriz de confusão gerada em forma aleatória. A matriz de confusão, obtida através da comparação dos sítios amostrais e do mapa, reflete o número de vezes em que há coincidências entre os dois. Um certo número de coincidências são obtidas fortuitamente. Por esta razão o teste de significância de uma matriz de confusão deve ser aplicado para completar a análise. O parâmetro estatístico Z se expressa como a razão entre o Kappa e a raiz quadrada de sua variância, também conhecido como variável padronizada Z, por apresentar uma distribuição normal. O seu nível de significância é dado pelo intervalo de confiança $\alpha/2$ da distribuição padronizada.

Este teste estatístico pode ser utilizado para comparar duas matrizes de confusão, obtidas por duas técnicas independentes e determinar se elas são ou não significativamente diferentes. Neste caso, o teste Z é expresso pela razão formada, no numerador pela diferença dos índices K obtidos de cada técnica e no denominador, pela

raiz quadrada da soma de suas variâncias, como apresentado em Congalton e Green (1999).

6.3. Resultados da Avaliação

O procedimento de levantamento de campo forneceu amostras suficientes em número e qualidade, para o desenvolvimento desta análise. O grau de aproveitamento da amostragem também foi adequada, somente sendo descartados dois *transectos* por ter baixa confiabilidade. Esta falta de confiabilidade da rotulação se produz quando os pontos amostrados localizam-se em área da imagem com alta heterogeneidade radiométrica.

6.3.1. Matrizes de Confusão e Índices K e Z das Diferenças entre Bandas

Os índices de acurácia obtidos pela técnica de diferença simples mostram ser esta técnica pouco consistente na qualidade dos resultados. De uma forma generalizada, ela obteve uma boa acurácia na comparabilidade multitemporal apenas no intervalo longo de 1984/2001. Apenas para registro científico, a qualidade no intervalo de tempo curto (2 e 5 anos) foi inaceitável. Considerando então o resultante da imagem detecção 1984/2001, pode-se observar nas Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4, as confusões temáticas havidas no mapeamento. Nestas tabelas as siglas correspondem: (ReFor) recuperação forte; (ReMed) recuperação média; (NaoMud) não mudança; (DeMed) degradação média e (DeFor) degradação forte; (Tmapa) Total de pontos por classe rotulada na imagem detecção e imagem detecção; e (Tcampo) o total de pontos por classe rotulada no trabalho de campo.

TABELA 6.2 – Matriz de confusão e índice K da diferença entre bandas nos anos 1984 e 2001.

		Supervisão de campo					
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	T _{mapa}
Mapa das mudanças	ReFor	6	2	6			14
	ReMed		11				11
	NaoMud		7	61	5		73
	DeMed			2	14	1	17
	DeFor			4	2	7	13
	T _{campo}	6	20	73	21	8	128

Acuracia total= 77.34%
 Índice Kappa = 0.6393
 Variância =0.0014462

O valor $Z= 16.8109$ desta matriz de confusão (Tabela 6.2) é maior que o valor 1.96 tabelado, resultando que a carta de detecção é significativamente melhor que uma outra produzida por um procedimento aleatório. A acurácia obtida é considerada muito boa para uma técnica quase em desuso. Esta técnica foi aplicada como indicado em Singh (1986), mas adotando a “moda máxima” como valor central da limiarização. Esta estatística central foi adotada empiricamente, já que se espera numa imagem detecção do semi-árido, que a moda seja o centro do intervalo dos pixels da classe “não mudança”, conforme assinalado por Chavez e MacKinon (1994), sendo a base da limiarização estatística segundo Fung e LeDrew (1988). Outra das vantagens do uso desta moda central é sua relativa independência com a forma da distribuição de frequências da imagem. Isso permite manter um centro de limiarização adequado, embora o histograma da imagem seja muito assimétrico, o que ocorre na imagem detecção de intervalo curto de tempo.

A acurácia total de 77,34% foi considerada satisfatória, embora exista alguma confusão entre a classe de não mudança e de recuperação forte. Este fato também foi observado em Maldonado (1999), quando a imagem foi rotacionada em 45°, pois o ângulo de

rotação produz os mesmos resultados que a diferença simples de imagens (banda do vermelho).

Na Tabela 6.3 apresentam-se os resultados dessa matriz de confusão no tratamento dos dados 1996/2001. Nota-se que houve um pequeno decréscimo na acurácia total, comparado a um período mais longo (Tabela 6.2), porém com significativa diminuição do valor índice K.

TABELA 6.3 – Matriz de confusão e índice K da diferença entre bandas nos anos 1996 e 2001.

		Supervisão de campo					Tmapa
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor	1		10			11
	ReMed		5	7			12
	NaoMud			77	2	1	80
	DeMed			4	6		10
	DeFor			9		6	15
	Tcampo	1	5	107	8	7	128

Acuracia total= 74.22%

Indice Kappa = 0.4419

Variância =0.0030246

O valor $Z= 8.0351$ é maior que o valor 1.96 tabelado, resultando que a carta de detecção é significativamente melhor que uma outra produzida aleatoriamente. Porém, na análise da Tabela 6.3 observam-se alguns casos de confusão inaceitáveis, como a similaridade de atributos radiométricos entre a classe de recuperação forte e de não mudança. Similar comentário é feito entre a classe de degradação forte e não mudança. Embora a acurácia total seja aceitável, os casos de confusão devem ser particularmente analisados segundo o erro tolerável pelo usuário da carta.

Na Tabela 6.4 apresentam-se os resultados dessa matriz de confusão no tratamento dos dados 1996/2001. Nota-se que a acurácia total foi baixa e o índice K inaceitável.

TABELA 6.4 - Matriz de confusão e índice K da diferença entre bandas nos anos 1999 e 2001.

		Supervisão de campo					T _{mapa}
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor	1		10			11
	ReMed		1	11			12
	NaoMud	2	3	75	3		83
	DeMed			7	4		11
	DeFor			5	2	4	11
	T _{campo}	3	4	108	9	4	128

Acuracia total= 66.41%

Índice Kappa = 0.2351

Variância = 0.012887

O valor $Z = 2.0710$ contido na matriz (Tabela 6.4) é maior que 1.96 tabelado, resultando que a carta de detecção é também significativamente melhor que uma outra produzida aleatoriamente. Porém, houve uma confusão inaceitável de todas as classes rotuladas no trabalho de campo com a classe não mudança, rotulada pela imagem.

Sumarizando, o melhor índice obtido pela diferença simples foi no intervalo longo de análise (1984 até 2001), provavelmente por ocorrer uma distribuição aproximadamente simétrica e de base mais ampla. Isso permite uma melhoria nos resultados do fatiamento simétrico e de uma proporção equilibrada entre classes.

6.3.2. Matrizes de Confusão e Índices K e Z das ACP

Esta técnica obteve baixos índices de acurácia e não foi consistente nos resultados, obtendo-se valores de 0.45, 0.25 e 0.37 respectivamente para os intervalos de análise multitemporal de 17 anos, 5 e 2 anos. Estes valores refletem uma baixa coincidência temática, como se pode observar nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7.

TABELA 6.5 – Matriz de confusão e índice K da ACP entre bandas nos anos 1984 e 2001.

		Supervisão de campo					T _{mapa}
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor	3	2				5
	ReMed		13	9			22
	NaoMud	3	5	61	15	1	85
	DeMed			1	6	2	9
	DeFor			2		5	7
	T _{campo}	6	20	73	21	8	128

Acuracia total= 68.75%

Indice Kappa = 0.4590

Variância =0.003628

O valor $Z= 7.6204$ da matriz é maior que o valor 1.96 tabelado, indicando que a carta de detecção é significativamente melhor que outra produzida aleatoriamente. Nesta matriz de confusão se observa um pouco de confusão entre a classe de não mudança e de recuperação média. Um importante número de amostras (15) rotuladas no campo como degradação média foi, com essa técnica, rotulado de não mudança pela imagem detecção. Estes casos de confusão são típicos da aplicação de um ângulo de rotação menor que o valor estabelecido como ótimo. A confusão com as classes de degradação foi produzida, provavelmente, por efeito dos pixels das nuvens/sombra sobre a rotação da ACP. Estes produzem um efeito de aumento no ângulo da rotação, ocasionando que alguns pontos das classes de degradação em baixas coberturas vegetais e outros de recuperação em altas coberturas, sejam misturados com os de não mudança, como comentado por Maldonado (1999).

Na Tabela 6.6 é mostrada a matriz de confusão derivada da aplicação da ACP aos dados 1996/2001. Há uma acurácia total bem satisfatória, contudo um valor de Kappa muito baixo, com diversos casos de sítios rotulados em campo como degradação e que não foram detectados pela técnica.

TABELA 6.6 – Matriz de confusão e índice K da ACP entre as datas 1996 / 2001.

		Supervisão de campo					Tmapa
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor			2			2
	ReMed	1	1	4	1		7
	NaoMud		4	96	6	3	109
	DeMed			3	1	1	5
	DeFor			2		3	5
	Tcampo	1	5	107	8	7	128

Acuracia total= 78.91%

Indice Kappa = 0.2502

Variância =0.022877

Pelo valor $Z= 1.6542$ menor que 1.96 tabelado, o mapa de detecção não é significativamente diferente que um produzido por outra técnica aleatória, reafirmando expressamente um índice K de concordância pobre. Esta detecção provavelmente foi muito afetada pela presença de nuvens pequenas na segunda data cujos valores influenciaram o cálculo dos parâmetros para aplicação da ACP. Além do que, estas nuvens têm pixels cujos valores são muito contrastantes com aqueles de mudanças. Assim, encontram-se nas imagens pixels com valores muito altos, representativos das nuvens brancas e valores muito baixos das áreas sombreadas pelas nuvens.

A seguir apresenta-se a Tabela 6.7 pertencente à detecção com o intervalo de tempo menor (2 anos), com a ACP indicando uma acurácia temática de 82,03% levemente superior aquele valor obtido para o período considerado de 5 anos, discutido anteriormente.

TABELA 6.7 – Matriz de confusão e índice K da ACP entre as datas 1999 / 2001.

		Supervisão de campo					Tmapa
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor			1			1
	ReMed	1	2	7	1		11
	NaoMud	2	2	98	5		107
	DeMed			2	3	2	7
	DeFor					2	2
	Tcampo	3	4	108	9	4	128

Acuracia total= 82.03%

Indice Kappa = 0.3749

Variância = 0.0041653

O valor do teste de significância foi $Z = 5.8089$ é maior que 1.96 tabelado, resultando que a carta de detecção é significativamente melhor que uma outra produzida aleatoriamente, contudo é baixo o valor do índice K e do Z, indicando concordância pobre. Esta foi causada provavelmente pelo fatiamento pouco apropriado, já que a curva é assimétrica e o fatiamento nesta técnica foi aplicado com centro na média da imagem total, e também pela presença das nuvens. Os altos valores das nuvens e os baixos valores das sombras, provavelmente tenham alterado muito os autovetores calculados pela técnica da ACP. Esta técnica, em geral, é a que produz baixo desempenho nos resultados, quando não são extraídas as nuvens/sombra da cena. Esse fato ocorreu em todos os intervalos de tempo investigados nesse trabalho. Sumarizando, pode-se afirmar que os resultados obtidos pela ACP, considerando todos os intervalos de tempo testados, tiveram baixos valores de K. Maldonado (1999) obteve, numa análise da mesma cena de Quixaba, um K de 0.68 para as datas 1984/1996, graças à minuciosa extração das nuvens.

A seguir, na Figura 6.2, é ilustrado um caso de difícil extração da nuvem, exemplificando as dificuldades enfrentadas pelos usuários para obter imagens limpas (sem presença de nuvens e suas respectivas sombras). Estas dificuldades aumentam

quando se trata das nuvens típicas da região semi-árida brasileira, pequenas e baixas que geralmente formam tênues ruas de nuvens.

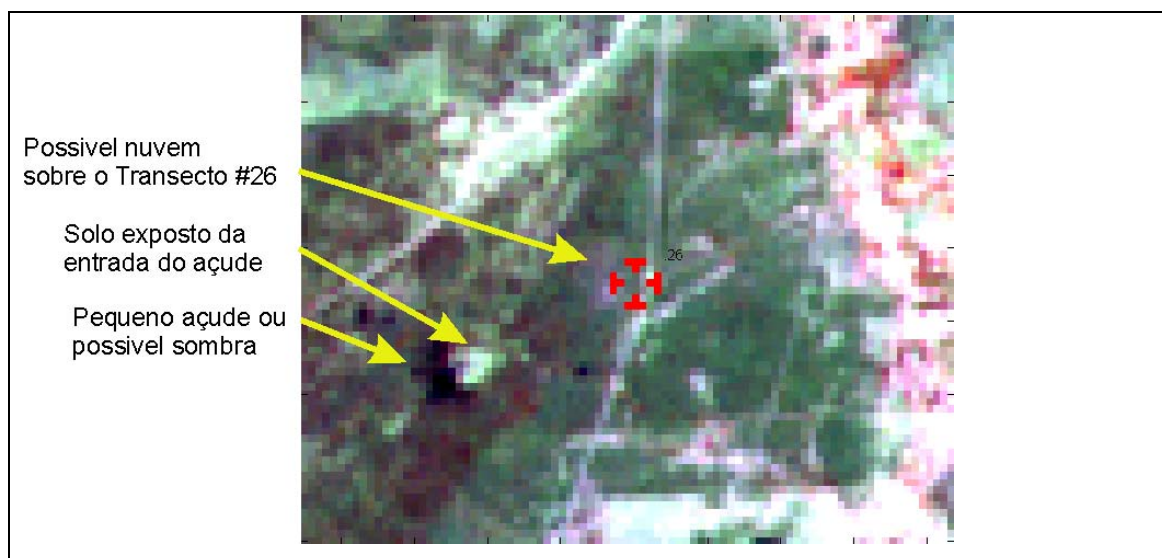


FIGURA 6.2 - Par nuvem/sombra ou par açude/área superpastoreada na entrada do açude.

Na Figura 6.2 pode-se observar diferentes feições que eventualmente indicam a presença de uma nuvem. Porém, estas feições também se assemelham um açude, que apresenta uma zona escura da lâmina de água e uma porção vizinha de solo sem vegetação, razão da flutuação do nível dessa lâmina em função do período de estiagem ou mesmo, do sobrepastoreio pelo trânsito constante do gado próximo a esse corpo d'água.

6.3.3. Matrizes de Confusão e Índices K e Z da RCEN

De uma maneira generalizada, a rotação controlada por eixo de não mudança apresentou muito bom desempenho em todos os intervalos entre imagens. Iniciando a série de resultados com esta técnica RCEN, apresenta-se a matriz de confusão (Tabela 6.8) para a análise das imagens multitemporais de 1984 e 2001. Notar que o valor da acurácia total (85.94%) supera até então os valores das outras técnicas (Diferença simples, ACP) já apresentadas. O mesmo acontecendo com o valor do índice K.

TABELA 6.8 – Matriz de confusão e índice K da RCEN entre as datas 1984 / 2001.

		Supervisão de campo					Tmapa
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor	5	2	1			8
	ReMed		13				13
	NaoMud	1	5	67	2		75
	DeMed			3	19	2	24
	DeFor			2		6	8
	Tcampo	6	20	73	21	8	128

Acuracia total= 85.94%

Indice Kappa = 0.7704

Variância =0.00023748

O valor $Z= 49.9923$ é muito maior que 1.96 tabelado, indicando que a carta de detecção de mudanças produzida pela RCEN é significativamente melhor que outra carta produzida aleatoriamente. Apesar dos valores de acurácia total e do Kappa serem elevados, existe confusão entre recuperação forte e media com não mudança em áreas de baixa cobertura, produzida provavelmente pela alta variabilidade da radiância. Isto pode indicar a necessidade de redefinir a limiarização dos casos de degradação em áreas de baixa cobertura, para aumento da acurácia desta técnica.

Na Tabela 6.9 é apresentada a matriz de confusão pertencente ao intervalo de tempo de 5 anos, cujos valores de acurácia de Kappa são bem significativos.

TABELA 6.9 – Matriz de confusão e índice K da RCEN entre as datas 1996 / 2001.

		Supervisão de campo					T _{mapa}
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor	1					1
	ReMed		5	3			8
	NaoMud			96	1	1	98
	DeMed			4	7		11
	DeFor			4		6	10
	T _{campo}	1	5	107	8	7	128

Acuracia total= 89.84%

Indice Kappa = 0.7080

Variância =0.0085115

O valor $Z= 7.6741$ é maior que 1.96, resultando que o mapa de detecção é significativamente melhor que outro produzido aleatoriamente. Observa-se, entretanto que houve confusão em quatro casos entre degradação forte (rotulada pelo mapa) e não mudança (rotulada no campo). Isso pode ser atribuído à presença de pequenas nuvens difíceis de extrair nas duas datas.

No caso específico da análise multitemporal num intervalo de 2 anos, o valor do teste $Z= 6.1314$ resultante das informações contidas na Tabela 6.10, é maior que 1.96 tabelado, demonstrando que a carta de detecção é significativamente melhor que outra produzida aleatoriamente. A RCEN produziu cartas com alguns pontos de confusão entre as classes de não mudança e recuperação forte. Uma primeira causa pode estar relacionada com a diminuição da correlação entre as mudanças da radiância e a cobertura do solo em pontos de vegetação esparsa. Outra pode estar relacionada com o cálculo da posição dos limiares, que não contou com suficientes amostras de recuperação para o cálculo estatístico dos agrupamentos. Porém, a acurácia total foi muito boa (88%), com um acerto temático específico para a classe não mudança da ordem de 95%.

TABELA 6.10 – Matriz de confusão e índice K da RCEN entre as datas 1999 / 2001.

		Supervisão de campo					Tmapa
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor	2		2			4
	ReMed	1	2	3			6
	NaoMud		2	98	2		102
	DeMed			5	7		12
	DeFor					4	4
	Tcampo	3	4	108	9	4	128

Acuracia total= 88.28%

Indice Kappa = 0.6313

Variância =0.010601

6.3.4. Matriz de Confusão e Índice K e Z da Técnica RCIA

Em uma visão generalizada, a Rotação controlada por índice de acurácia –RCIA somente funcionou adequadamente para o intervalo de tempo maior (17 anos). Com intervalos menores não completou seus parâmetros no processo de rotação para funcionar corretamente. Estes parâmetros são obtidos com amostras de todas as classes, e nestas imagens as amostras de recuperação foram insuficientes em número e qualidade. Isto ocorre porque a recuperação da caatinga é lenta e somente aparecem casos de recuperação média quando o intervalo de tempo for maior que 2 anos (intervalo 1999/2001) e de recuperação forte quando o intervalos for maior que 5 anos (1996/2001) .

Especificamente para o caso acima citado (17 anos), a técnica RCIA obteve um resultado adequado, porém não permitiu uma melhora condizente sob o ponto de vista de custo/benefício. Isto, porque não se obteve uma melhora proporcional da acurácia com o esforço para a análise dos dados de campo, e isto deve ser levado muito em consideração.

A seguir, na Tabela 6.11, apresenta-se a matriz de confusão do mapa de mudanças gerado para esta análise de 17 anos.

TABELA 6.11 – Matriz de confusão e índice K da RCIA entre as datas 1984 / 2001.

		Supervisão de campo					Tmapa
		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	
Mapa das mudanças	ReFor	5	3	1			9
	ReMed		12				12
	NaoMud	1	5	67	1		74
	DeMed			3	20	2	25
	DeFor			2		6	8
	Tcampo	6	20	73	21	8	128

Acurácia total= 85.94%

Índice Kappa = 0.7719

Variância =0.00027108

O valor $Z= 46.8827$ é maior que o valor 1.96 tabelado, fazendo com que a carta de detecção gerada seja significativamente melhor que outra produzida aleatoriamente. Apresentando uma acurácia total muito boa de 85.94%, e valor de $K = 0.7719$ muito bom. Nota-se nessa Tabela 6.11 que, no total de 128 sítios tratados, apenas quatro apresentam uma rotulação inadequada no mapa de mudanças, sendo um sítio de não mudança classificado erroneamente como recuperação media, e dois sítios de não mudança como degradação forte, e outro de recuperação forte erroneamente rotulado como não mudança. Alguns outros sítios não apresentaram concordância na rotulação, estando dentro de faixa de tolerância de erros próprios no processo de rotulação temática, sobretudo quando se estabelecem detalhadamente níveis de degradação ou recuperação.

6.3.5. Análise Comparativa

Na Tabela 6.12, é apresentada a resultante da comparação temática entre as técnicas, no mesmo intervalo de tempo 1984/2001. Os resultados obtidos com a RCEN e RCIA não são significativamente diferentes ao se observar os valores de $Z= 0.0665$. Por conseguinte, pode-se supor que estas técnicas produzam resultados equivalentes quando o período entre imagens multitemporais seja longo, uma vez que os valores de Kappa são satisfatórios para um delineamento temático, indicativo de uso e cobertura da terra.

TABELA 6.12 – Análise comparativa para o intervalo 1984/2001 através do parâmetro estatístico Z.

Técnica	Valor de Z da comparação entre técnicas				Índice K	Variância da matriz de confusão
	Diferença	ACP	RCEN	RCIA		
Diferença	-	2.5311	3.1951	3.1998	0.6393	0.0014462
ACP		-	5.0087	5.0110	0.4590	0.0036280
RCEN			-	0.0665**	0.7704	0.0002374
RCIA				-	0.7719	0.0002711

** não significativos a 95%

A seguir, na Tabela 6.13 pode-se constatar que, no tratamento comparativo das técnicas no intervalo de 5 anos, somente os resultados da Diferença simples e da ACP não são significativamente diferentes. Isso pode estar relacionado ao efeito atmosférico de magnitude similar nas duas datas utilizadas. Como já foi comentado, uma rotação de 45° na ACP produz os mesmos resultados temáticos daquela obtida pela técnica da Diferença simples. O fatiamento e rotulação foi o mesmo para ambas técnicas de detecção.

TABELA 6.13 – Análise comparativa para o intervalo 1996/2001, estatístico Z.

Técnica	Valor de Z da comparação entre técnicas				Índice K	Variância da matriz de confusão
	Diferença	ACP	RCEN	RCIA		
Diferença	-	1.1911**	2.4775	-	0.4419	0.0030246
ACP		-	2.5840	-	0.2502	0.0228770
RCEN			-	-	0.7080	0.0085115
RCIA				-	-	-

** diferenças não significativas a 95%

Nas Tabelas 6.13 e 6.14, não foram apresentados resultados da RCIA. Resultados com esta técnica foram inaceitáveis pela escassez de amostras confiáveis de recuperação forte e média, para controlar a rotação, conforme registrado em item anterior. Numa observação mais genérica, pode-se afirmar que a técnica RCEN, comparada às demais, tem melhor desempenho, para intervalos de análise mais curta, tomando-se como base o índice K.

TABELA 6.14 – Análise comparativa para o intervalo 1999/2001, estatístico Z.

Técnica	Valor de Z da comparação entre técnicas				Índice K	Variância da matriz de confusão
	Diferença	ACP	RCEN	RCIA		
Diferença	-	1.0706**	2.5852	-	0.2351	0.0128870
ACP		-	2.1100	-	0.3749	0.0041653
RCEN			-	-	0.6313	0.0106010
RCIA				-	-	-

** não significativo a 95%

Na Figura 6.3 são apresentados, na forma de barra, a comparação das acurácias de cada técnica. Pode-se observar que os desempenhos entre as técnicas RCEN e RCIA foram similares àqueles obtidos das análises multitemporais num intervalo de 17 anos em Quixaba.

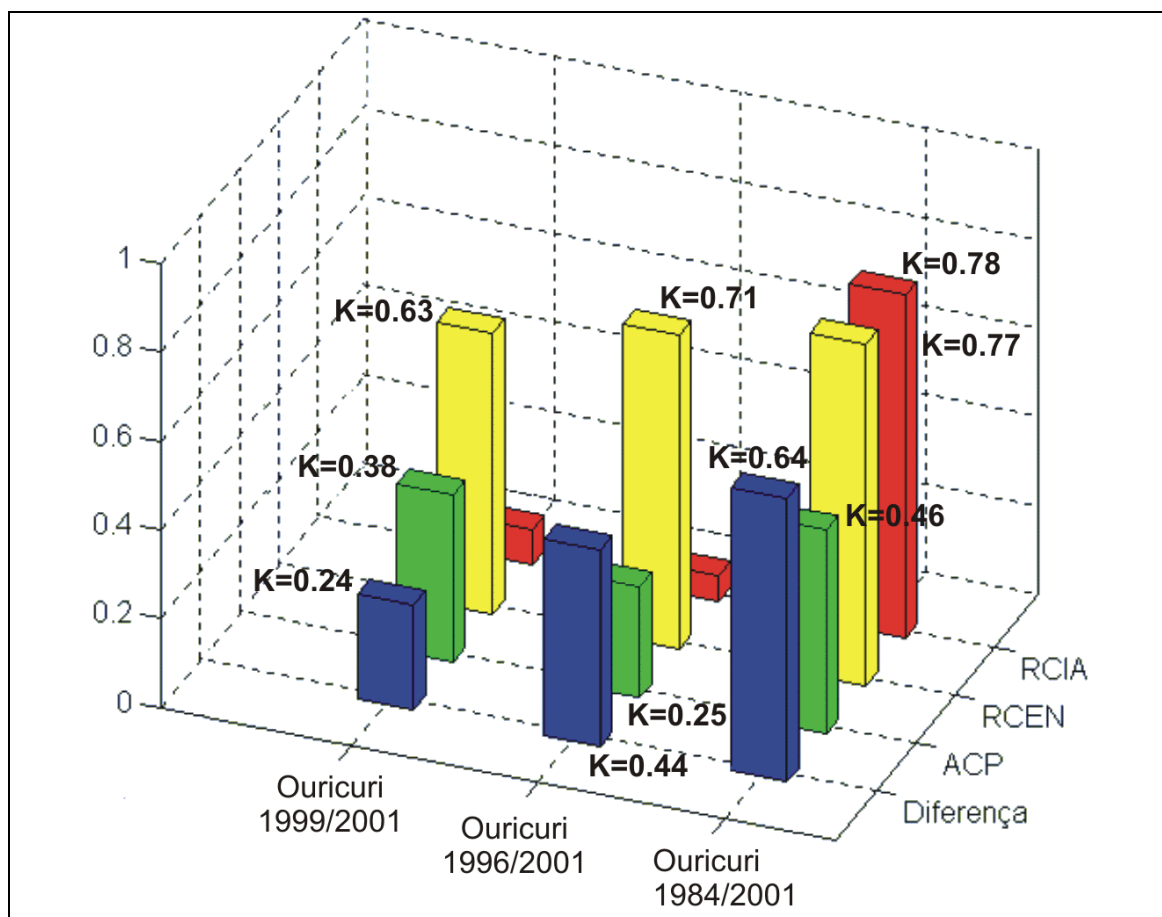


FIGURA 6.3 - Diagrama comparativo dos desempenhos das técnicas na região do semi-árido, segundo os diversos intervalos de tempo.

O baixo desempenho temático das técnicas nos intervalos multitemporais menores foi devido a que proporções reais entre degradação e recuperação não foram similares, ou seja, à medida que o intervalo de análise diminui, tem-se mais rótulos de degradação do que recuperação. Além disso, outra contribuição ao baixo desempenho é o fato de que

as imagens sofreram um fatiamento com limiares estatísticos, os quais são simétricos, centrados na média da imagem detecção.

Com base aos testes de significância, pode-se reafirmar que os resultados foram significativamente similares entre as técnicas RCEN e RCIA para intervalos maiores de tempo.

6.4. Conclusões e Recomendações

A comparabilidade entre técnicas, através dessa série de índices empregados na avaliação da capacidade de caracterização e delineamento temático, indica que foi a RCEN a mais consistente, com qualquer intervalo entre imagens. Não sofreu também, alterações na acurácia global pela proporção de nuvens/sombras presentes na cena. Além disso, a RCEN foi a única técnica que permitiu um mapeamento com boa acurácia em intervalos de tempo curtos. Em base as observações do funcionamento desta técnica, pode-se esperar que esta também seja consistente com intervalos anuais, o que é importante para estabelecer um sistema operacional de rápido monitoramento do uso das terras.

A limiarização estatística utilizada pela ACP e Diferença entre bandas teve desempenho aquém do esperado, quando o intervalo entre imagens foi menor. Por conseguinte, é conveniente a utilização de limiares dependentes das amostras como apresentado no Capítulo IV. Em áreas de baixa cobertura vegetal houve aumento da confusão entre as classes não mudança e degradação, além de não mudança e recuperação. Isso em razão da perda de correlação entre a radiância e a cobertura, quando a proporção de solo nu é elevada. Por isso é recomendável coletar mais amostras em áreas de cobertura vegetal um pouco mais adensada e nunca em áreas de cobertura esparsa ou menor a 30%.

6.5. Síntese Metodológica

Ao longo do presente trabalho foram aplicadas, desenvolvidas e analisadas técnicas para compor uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semi-árido. Nesta instância de síntese metodológica procura-se, com as diversas análises e respectivos índices estatísticos, configurar uma metodologia adequada para detectar mudanças e monitorar com acurácia consistente e aceitável na relação custo/benefício.

A técnica validada para detecção digital das mudanças foi a Rotação controlada por eixo de não mudança -RCEN. Os métodos adotados no levantamento de campo, *transectos*, descrição fitossociológica simples e pontos observacionais, foram adequados para a fase de rotulação dos sítios. Na etapa de fatiamento e rotulação da imagem detecção de mudanças, fica indicada a técnica de limiarização por agrupamento de amostras. Como informação complementar, registra-se que a Matriz de confusão, combinada com Análise Kappa, foi de significativa utilidade na análise comparativa das técnicas, permitindo avaliar a capacidade dos procedimentos adotados no delineamento temático das mudanças na paisagem.

Após a validação e a análise da capacidade dessas técnicas foi feita uma articulação para formar uma metodologia de detecção de mudanças considerada ideal para a região do semi-árido. As principais inovações desta metodologia são as interações entre os dados do levantamento de campo e a técnica digital de detecção de mudanças selecionada. Estas interações aconteceram, conforme anteriormente comentado, em três instâncias; a primeira no controle propriamente dito da técnica RCEN; a segunda na aplicabilidade da técnica de limiarização por agrupamento de amostras e, na terceira e última instância as amostras são utilizadas no cálculo da confusão temática e do índice de acurácia dos resultados.

Na Figura 6.4, é apresentado o fluxograma geral da metodologia proposta para detecção de mudanças, fruto da experiência na área de Quixaba e que foi aplicada às condições do semi-árido argentino (Valle Fértil), conforme discutido no Capítulo VII a seguir.

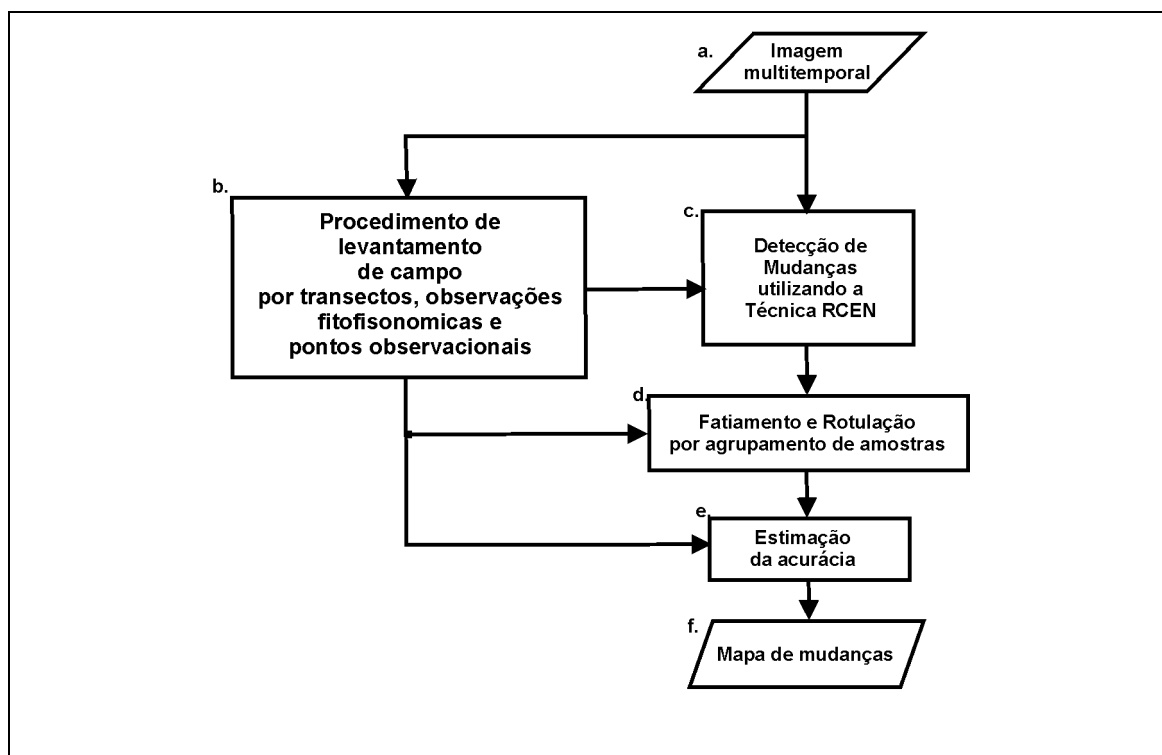


FIGURA 6.4 - Fluxograma resultante da síntese metodológica deste trabalho.

De uma maneira geral esta metodologia apresenta as seguintes características:

- a) está baseada completamente sobre imagens em modo radiância;
- b) o delineamento do levantamento das amostras de campo é estratificado segundo a delimitação visual de áreas homogêneas, podendo ser realizado em uma imagem recente, na forma de composição colorida realçada. Nesse levantamento de campo utilizam-se três formas de amostragem para o conhecimento fisionômico-estrutural do sítio: 1) transectos em linha de 50m, orientados na direção N-S, para registrar indicadores em estratos e substratos das fácies de caatinga; 2) descrição fitofisionômica para amostrar sítios típicos de recuperação da caatinga; 3) pontos observacionais para amostrar áreas agrícolas e outras fisionomias simples.
- c) a técnica Rotação controlada por eixo de não mudança – RCEN é a mais indicada para tratar do monitoramento da paisagem do semi-árido;
- d) o fatiamento, com posterior rotulação, está baseado na extração dos parâmetros estatísticos do agrupamento das amostras de campo, em modo radiância.

- e) a estimação da acurácia pode ser obtida através da matriz de confusão e da análise Kappa.
- f) os mapas de mudanças estão compostos por cinco classes, duas de degradação (média e forte), duas de recuperação (média e forte) e uma de não mudança.

CAPÍTULO 7

TESTE DA METODOLOGIA: ESTUDO DE CASO VALLE FÉRTIL (ARGENTINA)

7.1. Introdução

No centro oeste da Argentina, como em outras áreas, o processo de degradação produz diminuição da produtividade da terra. Este processo é desencadeado pela excessiva atividade agropecuária em ambientes susceptíveis a erosão, como acontece no ambiente da planície aluvial o qual será estudado neste Capítulo. Neste ambiente a degradação é favorecida diretamente pela aridez acentuada, solos de textura fina e cobertura vegetal esparsa. Neste contexto, o estudo dos processos de desertificação destas regiões deve empregar metodologias que incluam o sensoriamento remoto. Esta tecnologia ajuda na visualização da magnitude e direção da ação antrópica, permitindo ainda identificar o problema e mensurar a extensão da degradação.

A utilização da técnica Rotação controlada por eixo de não-mudança (RCEN), no tratamento de dados orbitais, pode facilitar a coleta de informação sobre mudanças relacionadas à ocupação do solo, servindo assim como ferramenta de caracterização e monitoramento ambiental de baixo custo. Permite ainda a combinação de imagens da mesma banda espectral, mas derivadas de diferentes sistemas sensores, como apresentado preliminarmente em Santos et al. (2004). A potencialidade desta técnica provém da análise da correlação entre bandas multitemporais, em ambientes que apresentem dinâmica espaço-temporal passível de observação através de seu comportamento radiométrico.

O objetivo do presente Capítulo é a detecção, caracterização e mapeamento de mudanças na cobertura vegetal em área do semiárido da Argentina, testando a técnica de detecção Rotação controlada por eixo de não-mudança – RCEN.

7.2. Área de Estudo

Este teste foi aplicado na área de Valle Fértil, do centro oeste da região semi-árida da Argentina. As características fisionômicas e climáticas são, de certa forma, similares àquelas de Ouricuri no nordeste brasileiro, onde foi desenvolvida a presente metodologia. Esta área encontra-se na unidade morfo-estrutural denominada “Gran Bajo Oriental” que se estende entre as províncias de San Juan e La Rioja. Esta é uma depressão tectônica coberta com sedimentos fluviais e eólicos. Os seus limites geográficos são os maciços serranos denominados serras de Valle Fértil a oeste e as serras de Chepes ao leste. O teste metodológico foi aplicado na unidade geomorfológica “planície aluvial” que está formada por duas subunidades, “planície proximal” e “planície distal” caracterizadas por diferentes texturas de solos. Na primeira predominam os solos com alta proporção de areias e na segunda o silte é o componente presente em maior proporção.

A planície aluvial proximal é a unidade de maior desenvolvimento areal do “Gran Bajo Oriental” e é chamada assim pela proximidade com os corpos serranos. Esta foi originada pela atividade dos cursos fluviais, coletores principais da drenagem hídrica proveniente das Serras “de Valle Fértil”. A subunidade se origina a partir da desembocadura do Rio “del Valle” e a confluência deste com o Rio Usno, em direção sul aproveitando a ampla superfície plana, que com orientação NO-SE forma a parte principal do “Gran Bajo Oriental”. Os materiais que integram a planície aluvial são variáveis em granulometria, predominando cascalho e areia.

Nesta parte proximal da planície se desenvolve um bosque de baixa cobertura arbórea em média de 30%, podendo ocorrer esporadicamente agrupamentos arbóreos de até 70% ou mais (vegetação em ilhas). Esse bosque é formado por Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) e Algarrobo doce (*Prosopis flexuosa*). Nos setores próximos aos cursos de água ocorre também a *Celtis tala*, *Geoffroea decorticans*, *Shinus polygamus* e *Acacia aramo*. O estrato arbustivo alcança grande desenvolvimento, tendo como espécie dominante a *Larrea cuneifolia* e as acompanhantes *Larrea divaricata*, *Prosopis torquata*, *Bulnesia retama*, *Condalia microphylla*, *Cassia aphylla* y *Trichomaria usillo*. Nesta unidade registra-se intenso

pastoreio e roçado, porém as características de infiltração dos seus solos permite a recuperação, fazendo com que o estado de degradação possa ser considerado intermediário. Dos distintos graus de erosão hídrica, a forma laminar é a que domina, contudo em alguns setores há maior degradação, com formação de grandes voçorocas associadas à intensidade do pisoteio animal.

A erosão do solo é favorecida pela textura fina (silte) e alto grau de pisoteio animal, picadas e trilhas, como também por se encontrar esta unidade no sopé da serra, disposta na bacia que suporta grandes volumes de água torrencial. Em alguns setores a eliminação do estrato arbóreo tem dado lugar a um processo de adensamento arbustivo exagerado (arbustização), enquanto em outros, as características do solo têm determinado a formação de amplas clareiras.

Na porção oriental da planície são encontrados os chamados “barrais”, cujas características edáficas são produzidas por sua posição distante dos corpos serranos recebendo sedimentos muito finos (argilas). Estas são áreas de eflorescência salino-salitrosa em terrenos baixos da drenagem do vale, formando superfícies argilosas pouco férteis. Os barrais, em função das características dos materiais constituintes, finos e de baixa permeabilidade, formam lagoas temporárias de diversas extensões, que em anos favoráveis de pluviosidade podem ser até permanentes. Os “barrais” mais relevantes em extensão são os denominados do “Barreal atravessado”. Nesta unidade existe um estado generalizado de degradação das comunidades vegetais, o que é observado através da baixa riqueza florística, que vem acompanhando este processo pela perda de solo, aumento da vazão, diminuição da infiltração, etc. (Martinez Carretero, 1989). Nesta condição desenvolve-se um bosque baixo, agrupado em áreas próximas a drenagem e ao lençol freático. Estes agrupamentos estão compostos por poucas espécies arbóreas, principalmente *Prosopis flexuosa* e *Celtis tala*, com 6m de altura média. Estes estão acompanhados por numerosas espécies arbustivas muitas delas halófilas. Algumas destas são *Geoffroea decorticans*, *Larrea cuneifolia*, *Cersidium praecox*, *Heterostachis ritteriana*, *Prosopis strombuliphera*, *Mimoziganthus carinathus*, *Plectocarpa tetracantha* entre outras. As herbáceas estão pouco representadas e em geral são espécies rústicas, como as gramíneas *Aristida adsencionis* e *Neobouteloa aristidiodes* e

as cactáceas *Tephrocactus papiracantha* e *Opuntia sulphurea*. Este ambiente está em processo de lenta degradação em quase toda sua extensão por colmatagem e salinização. Na Figura 7.1 é apresentada a localização da área de estudo, sobre o mapa do Chaco árido (semi-árido argentino).

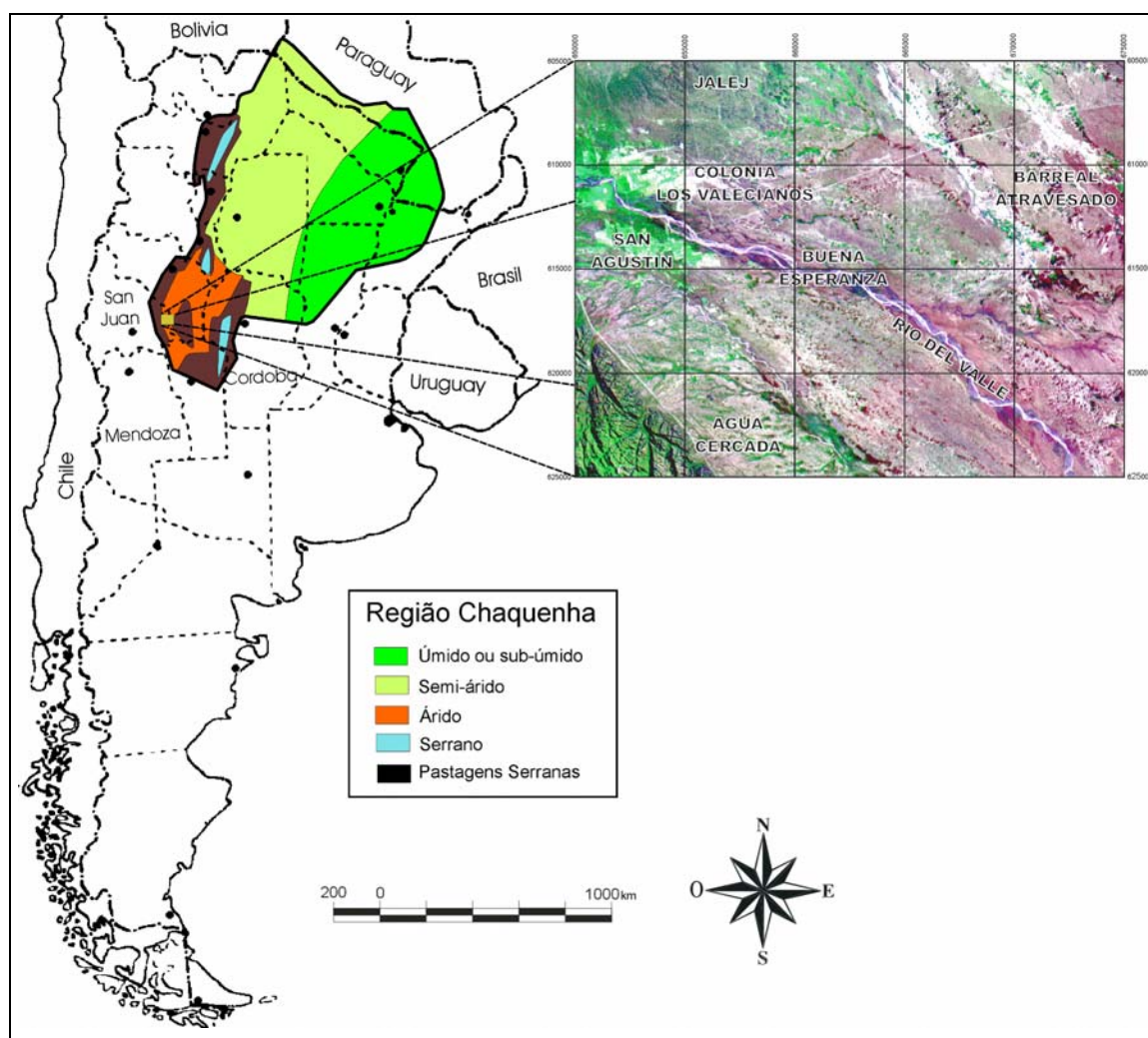


FIGURA 7.1- Área de estudo no semi-árido do centro-oeste da Argentina.

7.3. Materiais

Imagens: duas cenas TM/Landsat, correspondentes à órbita 266 ponto 81, de duas datas. A primeira, na passagem de 6 de setembro de 1987 do sensor TM e a segunda, de 12 de novembro de 2000 do sensor ETM+.

Base cartográfica: uma carta topográfica do Instituto Geográfico Militar-IGM Escala 1:100.000, setor San Agustín, e uma Carta-imagem IGM Escala 1: 100.000, setor San Agustín.

Suporte temático: Mapa Hidrogeológico de CRAS - Direção Regional de Água Subterrânea na escala de 1:100.000; mapa das fisionomias (FIGURA 7.2), para o Departamento Valle Fértil de 1996, Museo de Ciencias Naturales y Recursos Naturales, Gobierno de San Juan (Márquez et al.,1998) na escala de 1:250.000; e a carta das isoietas da Província de San Juan (Minetti, 1988) na escala de 1:1.000.000.

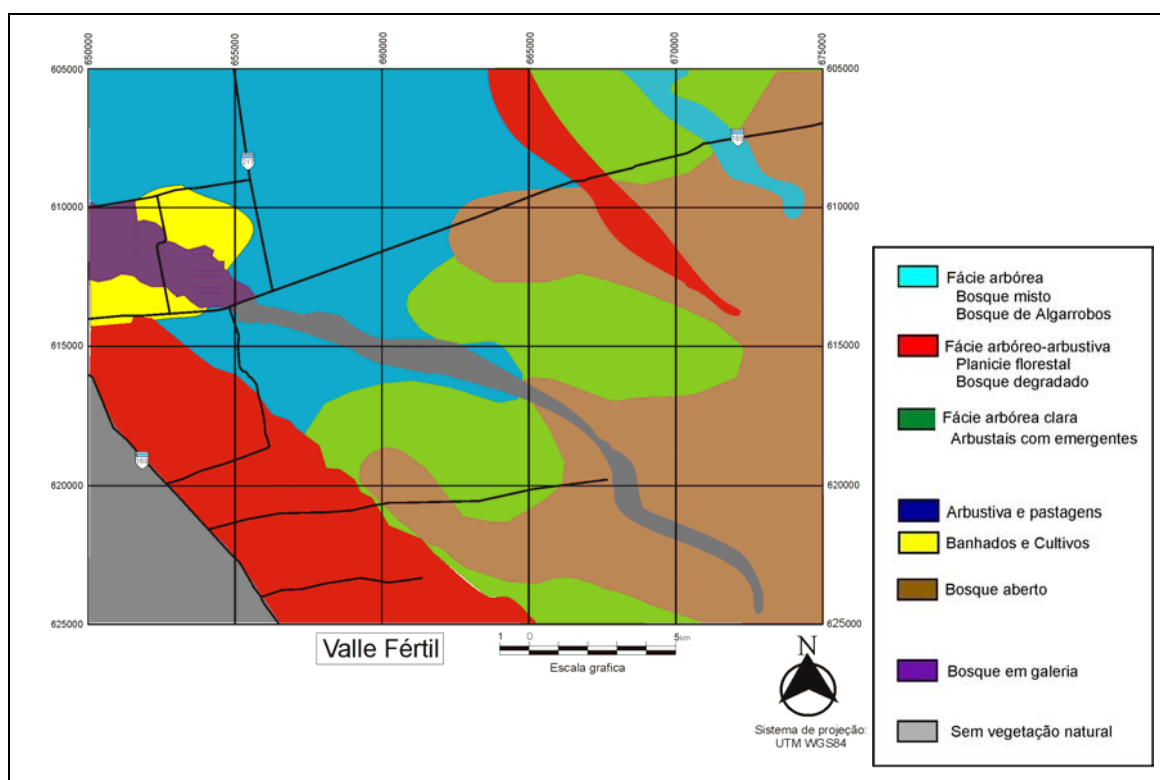


FIGURA 7.2 - Plano de informação temático das fisionomias da vegetação da área de Valle Fértil, utilizado para guiar a rotulação das amostras.

Planilhas do levantamento de campo: As planilhas do levantamento de campo de Ouricuri sofreram algum tipo de adequação para serem aplicadas em Valle Fértil, cujo conteúdo descritivo estão apresentados nas Figuras 7.3 e 7.4.

LOCALIZAÇÃO			RELEVO			FOTOS			GPS			MOMENTO					
Área:			Tipo:			Nº filme:			Ponto Nº:			Data: / /					
Local:			Posição:			Nº/Rumo: /			Lat.:			Hora ini:					
Fisionomia:			Declividade:			Nº/Rumo: /			Long.:			Hora fin:					
Orientação:			Orientação:			Nº/Rumo: /			Altitude:								
Distância sobre a trena (m)												23	24	25			
Arbóreo																	
h \bar{x} =																	
volume: Ba Me Alt																	
Arbustivo																	
h \bar{x} =																	
volume: Ba Me Alt																	
Herbáceo																	
h \bar{x} =																	
volume: Ba Me Alt																	
Trepadeira																	
Bromélia																	
Cobertura do solo																	
Superfície do solo																	
Cobertura do solo			Superfície do solo			Morfogênese atual			Destruição parcial da vegetação			Indicadores pastejo			Vizinhanças (m / Km)		
1) Lenha grossa			1) argila			1) Nula			1) Fogo			1) Presença de veredas			1) Açudes:		
2) Lenha fina			2) silte			2) Fraca / Laminar			2) Machado			2) Esterco de gado			2) curral:		
3) Árvore morta			3) arenoso fino			3) Pedestal / Média			3) Coleta			3) Esterco de cabra			3) rancho:		
4) Folhiagem			4) arenoso grosso			4) Suícos / Alta			4) Rara ou nula			4) Vegetação pastejada			4) caminhos:		
5) Serrapilheira			5) cascalho			5) Vossorocas			5) Pastoreio			5) Ausência aparente			5) cercas:		
6) Ausente			6) seixos e matacozes			6) Solterrados									6) > 4 km		
7) rochas e blocos			7) rochas e blocos														
1-			7-														
2-			8-														
3-			9-														
4-			10-														
5-			11-														
6-			12-														
			13-														
			14-														
			15-														
			16-														
			17-														
			18-														
			19-														
			20-														
			21-														
			22-														
			23-														
			24-														

FIGURA 7.3 – Planilha de campo utilizada no modo transecto em linha, correspondente à porção da trena de 0 até 25m. Uma segunda folha foi empregada para aquisição de informação na porção da de 25 até 50m.

A ficha da Figura 7.3 contém a pauta da trena e os códigos numéricos de elementos cuja ocorrência precisa ser indicada metro a metro no decorrer do *transecto*. A planilha da

Figura 7.4 possui espaço junto aos códigos para anotações complementares sobre as observações das vizinhanças dos *transectos*.

LOCALIZAÇÃO	RELEVO	FOTOS	GPS	MOMENTO
Área:	Tipo:	Nº filme:	Ponto Nº:	Data: / /
Local:	Posição:	Nº/Rumo: /	Lat.:	Hora ini:
Fisionomia:	Declividade :	Nº/Rumo: /	Long.:	Hora fin:
	Orientação :	Nº/Rumo: /	Altitude:	

<p>Abundância-Dominância</p> <p>5) muito abundante, cob. >75% ⊕</p> <p>4) abundante, cob. de 50-75% ⊕</p> <p>3) qualquer n°, cob. de 25-50% ⊕</p> <p>2) qualquer n°, cob. de 10-25% ⊕</p> <p>1) espécie rara, cob. <10%</p> <p>+) muito rara, quase solitária</p>	<p>Espécies 3</p>
<p>Superfície do solo</p> <p>1) argila</p> <p>2) silte</p> <p>3) arenoso fino</p> <p>4) arenoso grosso</p> <p>5) cascalho</p> <p>6) seixos e matacões</p> <p>7) rochas e blocos</p>	<p>Destruição parcial da vegetação</p> <p>1) Fogo</p> <p>2) Machado</p> <p>3) Coleta</p> <p>4) Rara ou nula</p> <p>5) Pastoreio</p>
<p>Morfogênese atual</p> <p>1) Nula</p> <p>2) Fraca / Laminar</p> <p>3) Pedestal / Média</p> <p>4) Sulcos / Alta</p> <p>5) Vossorocas</p> <p>6) Soterrados</p>	<p>Indicadores de pastoreio</p> <p>1) Presença de veredas</p> <p>2) Esterco de gado</p> <p>3) Esterco de cabra</p> <p>4) Vegetação pastoreada</p> <p>5) Ausência aparente</p>
<p>Cobertura do solo</p> <p>1) Lenha grossa</p> <p>2) Lenha fina</p> <p>3) Árvore morta</p> <p>4) Folhagem</p> <p>5) Serrapilheira</p> <p>6) Ausente</p>	<p>Vizinhanças (m / Km)</p> <p>1) Açudes:</p> <p>2) curral:</p> <p>3) rancho:</p> <p>4) caminhos:</p> <p>5) cercas:</p> <p>6) > 4 km</p>

FIGURA 7.4 – Planilha de campo usada para o levantamento fito-fisionômico simples.

Considerando que a rotulação do sítio está relacionada estreitamente com o intervalo entre as imagens, alguns elementos encontrados no levantamento podem ser importantes indicadores de processos para serem considerados durante a rotulação do sítio amostrado. Por exemplo, no “item superfície” de solo, a linha onde está referido o código, pode ser ampliado com observações sobre a forma da distribuição espacial no micro-relevo. No caso das argilas ou materiais muito finos como silte, a forma de colmatagem do micro-relevo, algumas vezes soterrando a base dos arbustos, indica claramente o processo que produz a mudança na cobertura vegetal. Outras observações que devem ser indicadas nesta planilha estão relacionadas com a forma e disposição espacial de outros elementos que cobrem o solo como folhagem, serrapilheira e lenha. A proporção desta correspondência ou não, com as plantas conjuntamente com a observação simples da penetrabilidade do solo entre plantas indica o tipo de processo

atuante. As observações de vizinhança podem ser ainda completadas nesta planilha com estimativas de rumo, distância e dimensão dos elementos de interesse, casas, estradas, currais, culturas, cercados, etc.

A planilha da Figura 7.4 também pode ser utilizada de forma individual para ser preenchida nos casos de descrições fitofisionômicas simples. Nestes casos, na caixa superior à direita da planilha dessa Figura 7.4, podem ser anotadas as espécies vegetais presentes e seu respectivo valor de abundância/dominância. Outros elementos adicionais observados podem ser anotados na caixa correspondente, exemplificando a textura do solo, cobertura da superfície do solo (serrapilheira, folhagem, lenha). Desta planilha obtêm-se indicadores do processo referido com correspondência vertical da vegetação com a cobertura do solo, entre outros.

7.4. Método

O procedimento metodológico testado nesta área de Valle Fértil está formado pelas técnicas (de campo e de tratamento e análise digital) validadas no decorrer deste trabalho de tese, conforme, descritas nos Capítulos IV, V e VI. A seguir apresenta-se na Figura 7.5 o fluxograma da metodologia testada.

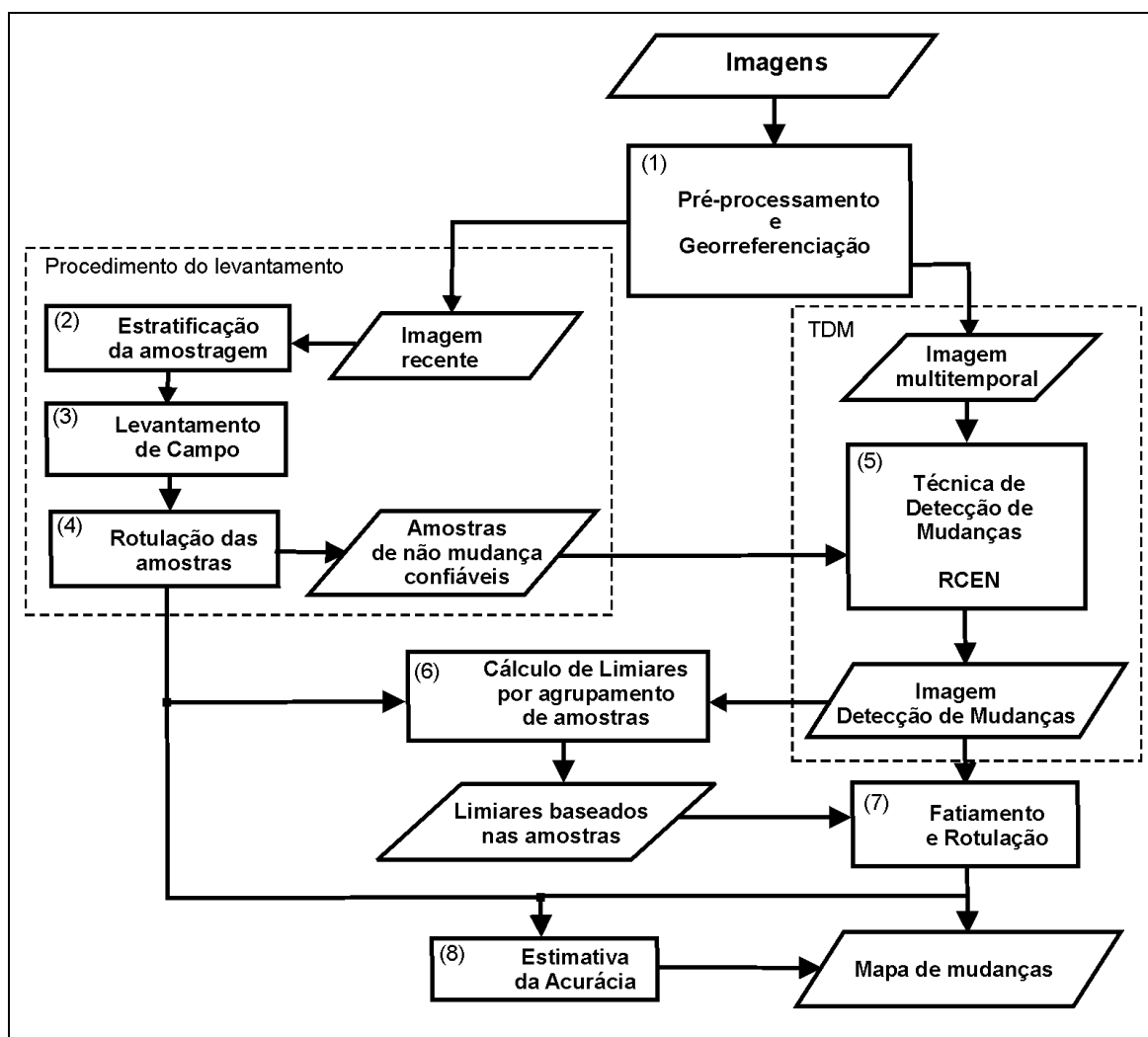


FIGURA 7.5 - Fluxograma da metodologia testada em Valle Fértil (Argentina).

A aplicação de todo esse procedimento compreende uma série de etapas, devidamente enumeradas e descritas a seguir, como:

- (1) um pré-processamento simples para obter imagens radiância em conformidade geométrica. Esse está limitado a uma calibração radiométrica, que é dependente dos parâmetros do sistema sensor e, posteriormente, a uma correção geométrica para obter as imagens georreferenciadas no sistema de referência comum a todas as imagens;
- (2) estratificação da área utilizando uma imagem realçada em composição colorida; como foi apresentado no item 4.2.1 do Capítulo IV, utiliza-se uma composição formada pela 2ª e 3ª componentes do produto da ACP (resultante de todas as bandas ópticas do TM/Landsat) e completada com a banda do vermelho TM3. A 2ª componente apresenta a variabilidade da imagem na componente ortogonal ao eixo de maior variabilidade da imagem, que representa, geralmente, a variabilidade espectral intrínseca da vegetação. A 3ª componente apresenta uma variabilidade moderada, geralmente associada a variações ambientais e de solos;
- (3) levantamento de campo, cuja técnica para essa região do semi-árido é adaptativa. A coleta de dados se realiza através de transectos de 50m quando se trata de vegetação natural complexa; através de levantamento fitofisionômico simples, no caso de um sítio de cobertura vegetal com evidências claras dos processos de degradação ou recuperação atuantes; e pontos observacionais, quando o sítio amostral não necessite de maiores registros, além de uma fotografia e uma descrição simples;
- (4) rotulação das amostras em quatro classes de mudanças (degradação forte, degradação média, recuperação forte e recuperação média) e uma de não-mudança, sendo também estimado o grau de confiabilidade do rótulo que identifica cada amostra, como discutido nos itens 4.2.6 e 4.2.7 do Capítulo IV;
- (5) aplicação da técnica de detecção de mudanças (TDM) controlada por parâmetros calculados com base nos dados do levantamento de campo (RCEN), como apresentado no item 5.3.1 do Capítulo V;
- (6) cálculo dos limiares entre as classes de mudanças na imagem detecção através dos agrupamentos das amostras, segundo apresentado no item 5.3.1.4 do Capítulo V;

- (7) fatiamento e rotulação para discretizar a imagem detecção de mudanças do modo contínuo (número real) para uma imagem temática (número inteiro), gerando então o mapa de mudanças, segundo apresentado no item 5.3.1.4 do Capítulo V;
- (8) estimativa da acurácia da detecção através do índice K, utilizando a análise Kappa da matriz de confusão.

Conforme comentado no decorrer desta tese, a principal inovação desta metodologia é a participação dos dados do levantamento de campo em três instâncias. Na primeira, as amostras rotuladas mais confiáveis controlam a técnica digital de detecção de mudanças; na segunda as amostras agrupadas por classe controlam o fatiamento; e na terceira, participam da estimativa da acurácia do mapa de mudanças.

Nota-se que nesta metodologia especificamente desenvolvida para a região do semi-árido, a qualidade dos dados do levantamento influencia diretamente na qualidade do resultado final, o que motivou uma descrição detalhada do levantamento de campo no decorrer desta tese.

7.5. Resultados e Discussão

Na Figura 7.6 apresenta-se a imagem atual (ano 2000) em composição colorida das Bandas TM4, TM5 e TM3, onde foram analisadas algumas características espectrais importantes para a etapa de planificação da amostragem.

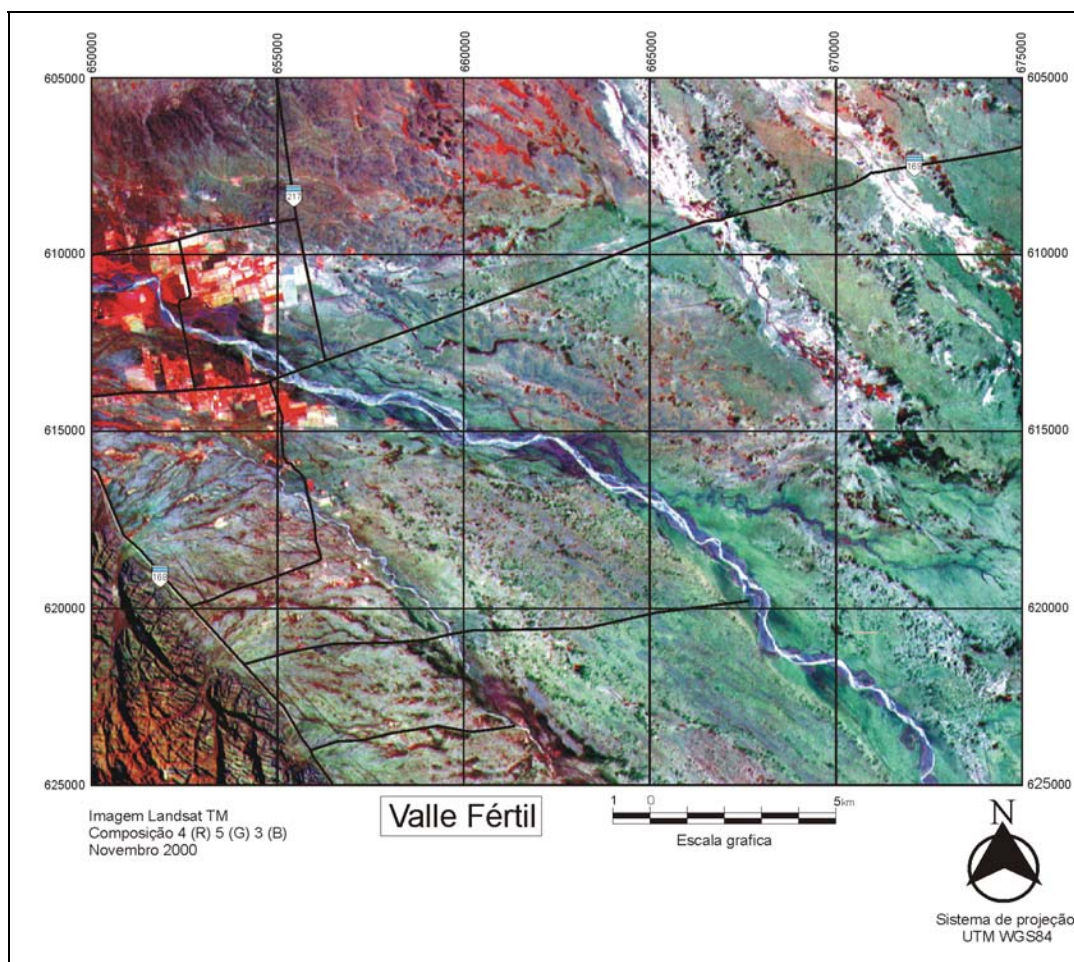


FIGURA 7.6 - Imagem composição colorida ano 2000 da área de estudo (bandas TM4, TM5 e TM3) em Valle Fértil.

No centro da Figura 7.6 observa-se o Rio San Agustín, de regime hídrico temporário. No sudoeste, observa-se a serra de Valle Fértil, não incluída no presente estudo. A zona agrícola situa-se no noroeste da área, ocupando as terras mais produtivas, com o lençol freático disponível para irrigação das culturas. No nordeste da imagem da Figura 7.6, encontram-se os “barrais”, áreas baixas, com sedimentação de material argiloso que, quando seco, apresentam alta refletividade. No noroeste da cena também encontra-se a colônia agrícola “Los Valencianos”, atualmente com elevado grau de degradação, apresentando solos compactados e medianamente salinizados. Estas áreas agrícolas possuem alta refletividade em todas as bandas espectrais e foram previamente delimitadas para minimizar sua participação na proporção de plots do delineamento

amostral. Nestas mesmas áreas, a coleta das amostras tem baixo aproveitamento como já foi mencionado anteriormente, por possuírem pouca confiabilidade radiométrica em razão de sua alta variância. Isto ocorre principalmente em áreas de solos claros e coberturas vegetais totais menores que 30%. Nestas áreas, a resposta radiométrica estrita da vegetação é uma componente sem significância na resposta total.

7.5.1. Resultado da Estratificação da Amostragem

Um trabalho prévio de estratificação da paisagem orientou a amostragem não aleatória baseada na imagem da Figura 7.7.

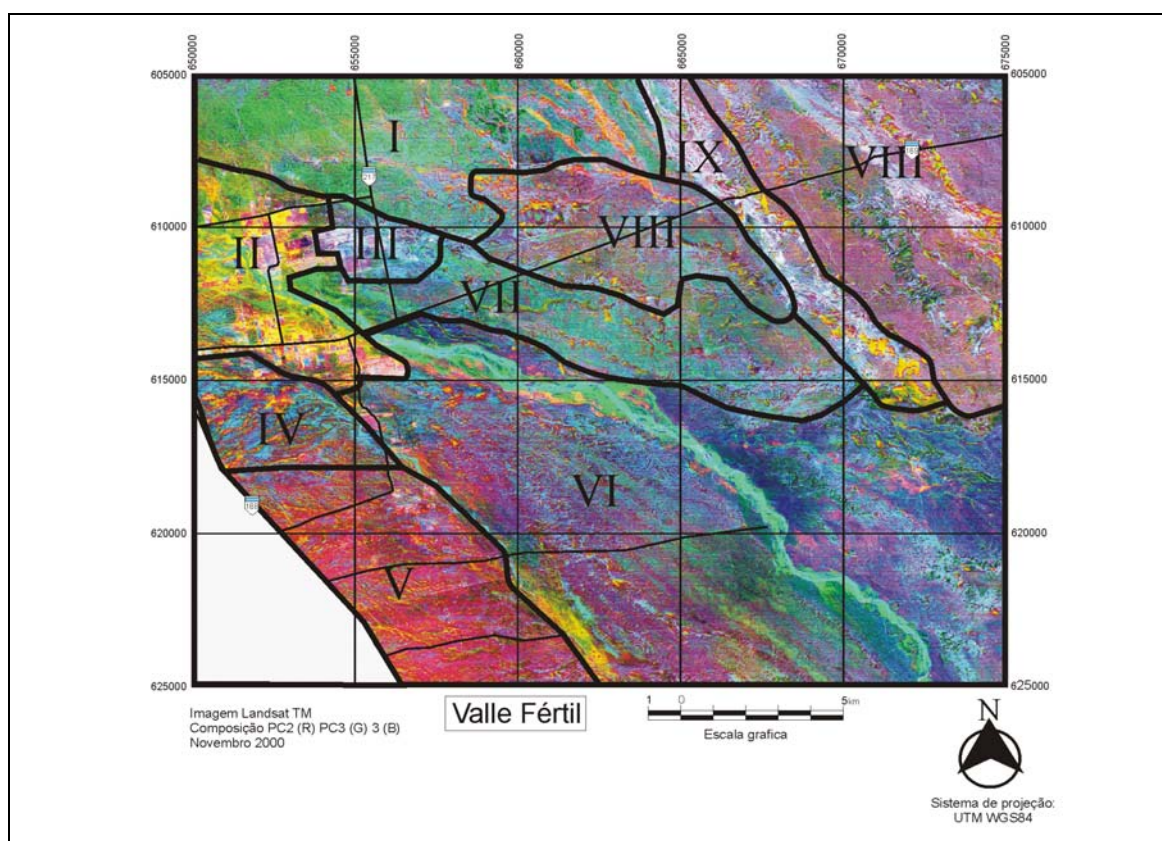


FIGURA 7.7- Estratificação da área de Valle Fértil segundo a delimitação visual da composição colorida PC2PC3Banda3, obtida a partir da imagem ETM do ano 2000.

A delimitação foi baseada na textura e cor da imagem PC2PC3B3 e está relacionada com uma sub-estratificação ambiental, conforme definido em Salmuni et al. (1998) e Maldonado et al. (1999). Na rotulação ambiental destes estratos constam: I- Bosque misto dos areais; II- Área agrícola produtiva; III- Área agrícola improdutivo; IV- Bosque aberto ; V- Planície florestal; VI- Planície arbustiva; VII- Bosque degradado; VIII- Bosque misto; IX- Arbustais das zonas baixas argilosas (barrais). Algumas áreas disjuntas, com similaridade de textura e cor, foram agrupadas no mesmo estrato amostral, como os polígonos VIII, de bosques mistos de algarrobo e quebracho, cuja espacialização pode ser observada na Figura 7.7.

Na Figura 7.8 apresenta-se todo o esquema de amostragem em campo. Nota-se que foi aproveitada a estrada do norte da área para facilitar uma amostragem mais eficiente.

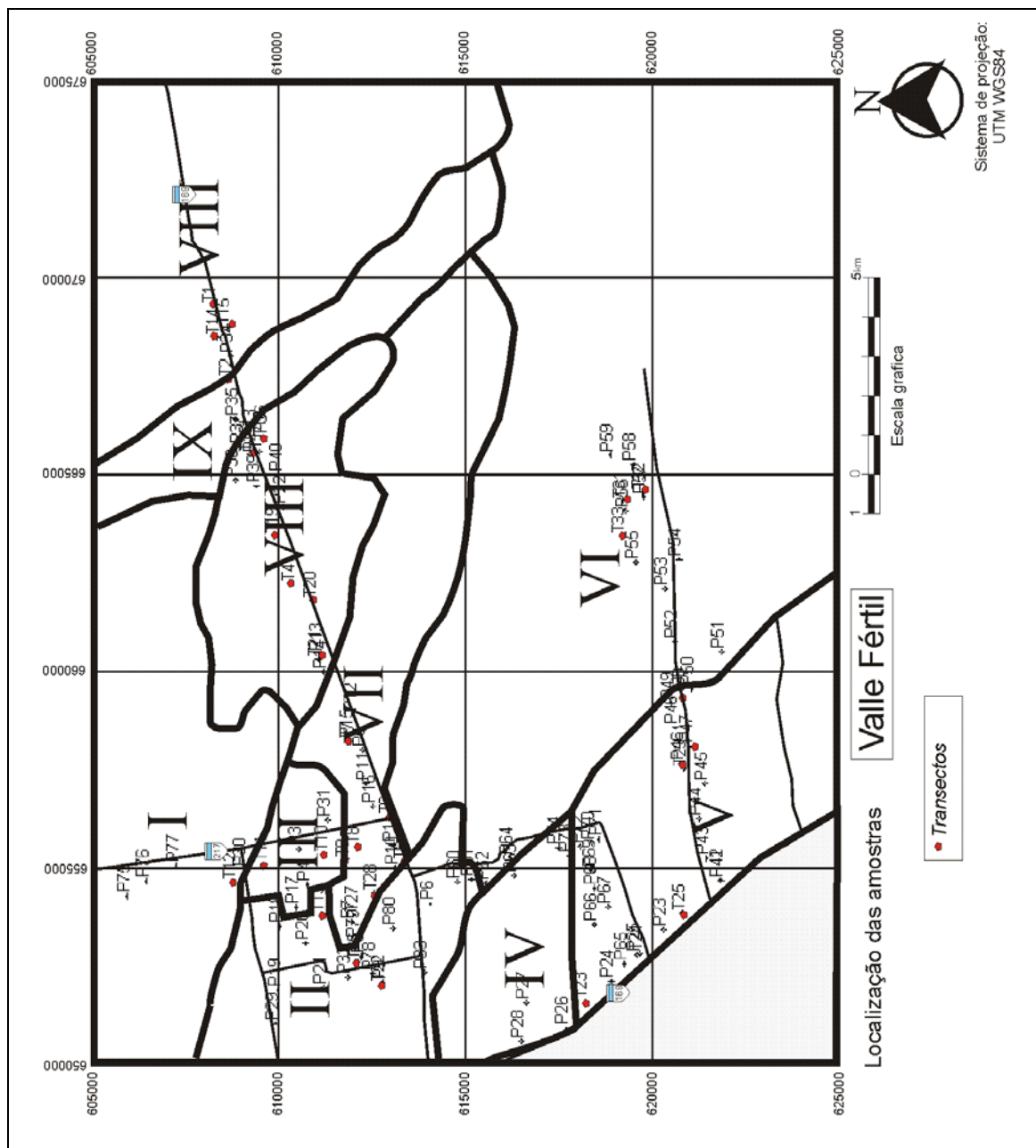


FIGURA 7.8 - Distribuição georreferenciada dos transectos (T), observações fitofisionômicas e pontos observacionais (P), utilizados na amostragem.

Nesta Figura 7.8 pode-se observar os 37 pontos de vegetação natural amostrados pela forma de transectos, os 65 pontos com observações fitofisionômicas simples e 112 pontos observacionais. Esta amostragem foi completada de forma satisfatória num total

de nove dias, fornecendo amostras de não-mudanças suficientes para o controle da técnica digital de detecção de mudanças – RCEN.

7.5.2. Resultado da Aplicação da Rotação Controlada por Eixo de Não-Mudança – RCEN

Na Figura 7.9 pode ser analisada a qualidade dos dados das imagens. Na análise visual dos histogramas pode-se estimar que os dados são de boa qualidade, pois não se observam descontinuidades radiométricas. Por outro lado, as formas indicam que as imagens possuem um contraste adequado para serem utilizadas.

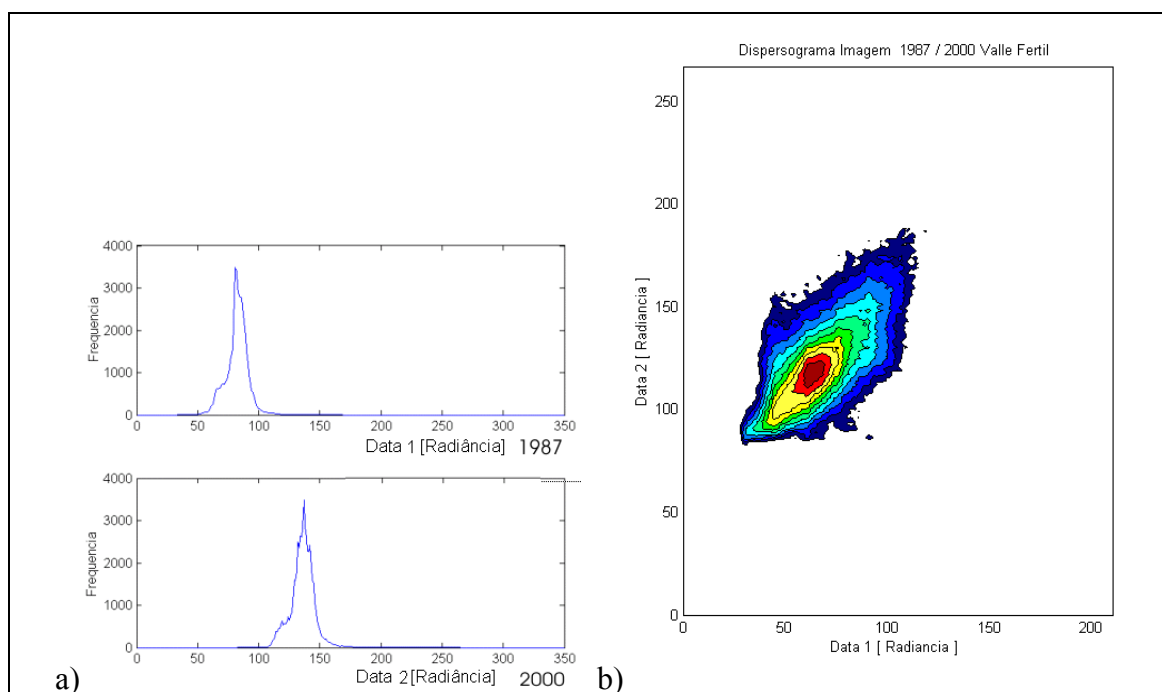


FIGURA 7.9 – Histogramas da banda individual do vermelho em (a); e dispersograma da imagem multitemporal das duas bandas em (b) para as datas 1987 e 2000.

Na Figura 7.9(a) são observados os histogramas das duas bandas do vermelho de 1987 e 2000. Têm uma forma similar, porém médias diferentes, de $82 \text{ W sr}^{-1}\text{m}^{-2}$ para a primeira data e de $138 \text{ W sr}^{-1}\text{m}^{-2}$ para a segunda data. Na Figura 7.9(b) observa-se uma acentuada assimetria no sentido ascendente do dispersograma, produzida pela maior quantidade de

pixels de alto brilho na segunda data (2000). Isso indica maior proporção de pixels de degradação, considerando que esses pixels possuem valores de radiância relativamente maiores na segunda data, visto que no embasamento da técnica há sempre a existência de um eixo de não-mudança.

Apenas como informação adicional e para reforçar o cuidado na seleção dos pontos de não-mudança, cita-se que para esta técnica foram selecionados pontos de não-mudança confiáveis. Os alvos claros de não-mudança foram quatro, dois amplos cruzamentos de estradas de chão e dois afloramentos rochosos amostrados por ponto observacional. Evitaram-se alvos agrícolas ou sítios onde ocorrem variações espaciais na umidade e cobertura do solo, como ocorre nas áreas de baixios de solos argilosos e salinizados. Os alvos medianamente escuros, em ambas as datas, foram coletados em 11 pontos de vegetação natural, de cobertura média a alta, rotulados a partir de informações derivadas dos *transectos* em campo.

A Figura 7.10 apresenta a janela de cálculo do módulo RCEN do sistema para rotação controlada do programa SIREI. Esta operação é feita automaticamente por este programa, porém pode também ser feita de forma manual, com os mesmos resultados. Nesta operação foram extraídos das imagens radiância os pares de valores de cada ponto para estabelecer a reta de regressão, cuja inclinação é formada pelo ângulo de rotação definido na fórmula de cálculo da imagem detecção.

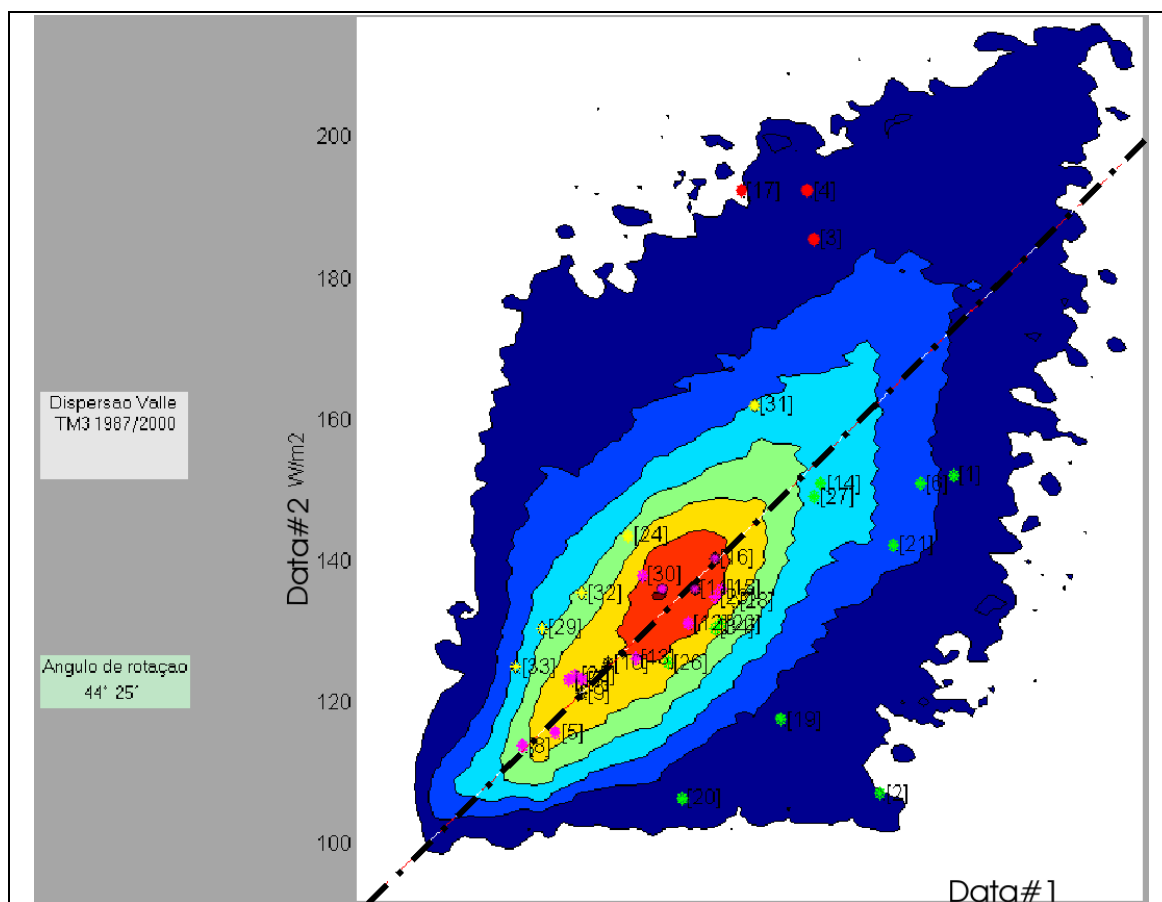


FIGURA 7.10 - Dispersograma da imagem multitemporal em Valle Fértil, na tela do programa de extração automática de parâmetros para cálculo do ângulo de rotação. Os números [n°] indicam sítios amostrais rotulados de não-mudança.

7.5.3. Resultado do Fatiamento e Rotulação

As amostras foram analisadas em gabinete para sua rotulação relativa ao intervalo de tempo entre imagens. Nesta rotulação a principal consideração é o tempo de 13 anos entre as datas das imagens Landsat utilizadas. Este intervalo é suficiente para produzir recuperação que pode ser analisada através de indicadores como a complexidade dos estratos, a correspondência da serrapilheira com a cobertura, o número de indivíduos adultos em cada estrato, entre outros. O aproveitamento das amostras foi bom, porém muitas amostras de descrições fitofisionômicas simples e pontos observacionais feitos

em áreas de baixa cobertura foram descartadas por apresentarem pouca confiabilidade radiométrica, sendo que nestes, os pixels vizinhos apresentavam muita heterogeneidade radiométrica.

Assim, a rotulação e a confiabilidade do rótulo foi referida ao intervalo de 13 anos, entre a imagem última data (2000) e a anterior (1987). O período é suficientemente grande para apresentar muitos sítios com processos de degradação e recuperação sucessivos. Esta complexidade é expressa na presença simultânea de indicadores de degradação e de recuperação na vegetação, com estes casos sendo referidos como de baixa confiabilidade. Nestes casos a confiabilidade pode ser melhorada, analisando-se a distribuição relativa entre a cobertura vegetal e os indicadores de solo, como a compactidade e a cobertura da superfície por materiais de origem vegetal (folhagem, serrapilheira, lenha, etc.).

De uma maneira geral, a rotulação para ser confiável em áreas de não-mudança amostradas através de transectos e deve apresentar uma estrutura vertical madura (indivíduos adultos nos sub-estratos superiores correspondentes), diversidade de espécies e equitatividade segundo o caso. Não devem ser observados indicadores de mudanças (ação antrópica, erosão, etc.), o que diminui a confiabilidade da rotulação para ser utilizada no controle da técnica digital de detecção.

Na Figura 7.10 é apresentado o resultado final do processo de detecção e rotulação das mudanças; ou seja, o Mapa de mudanças em Valle Fértil entre os anos de 1987 e 2000.

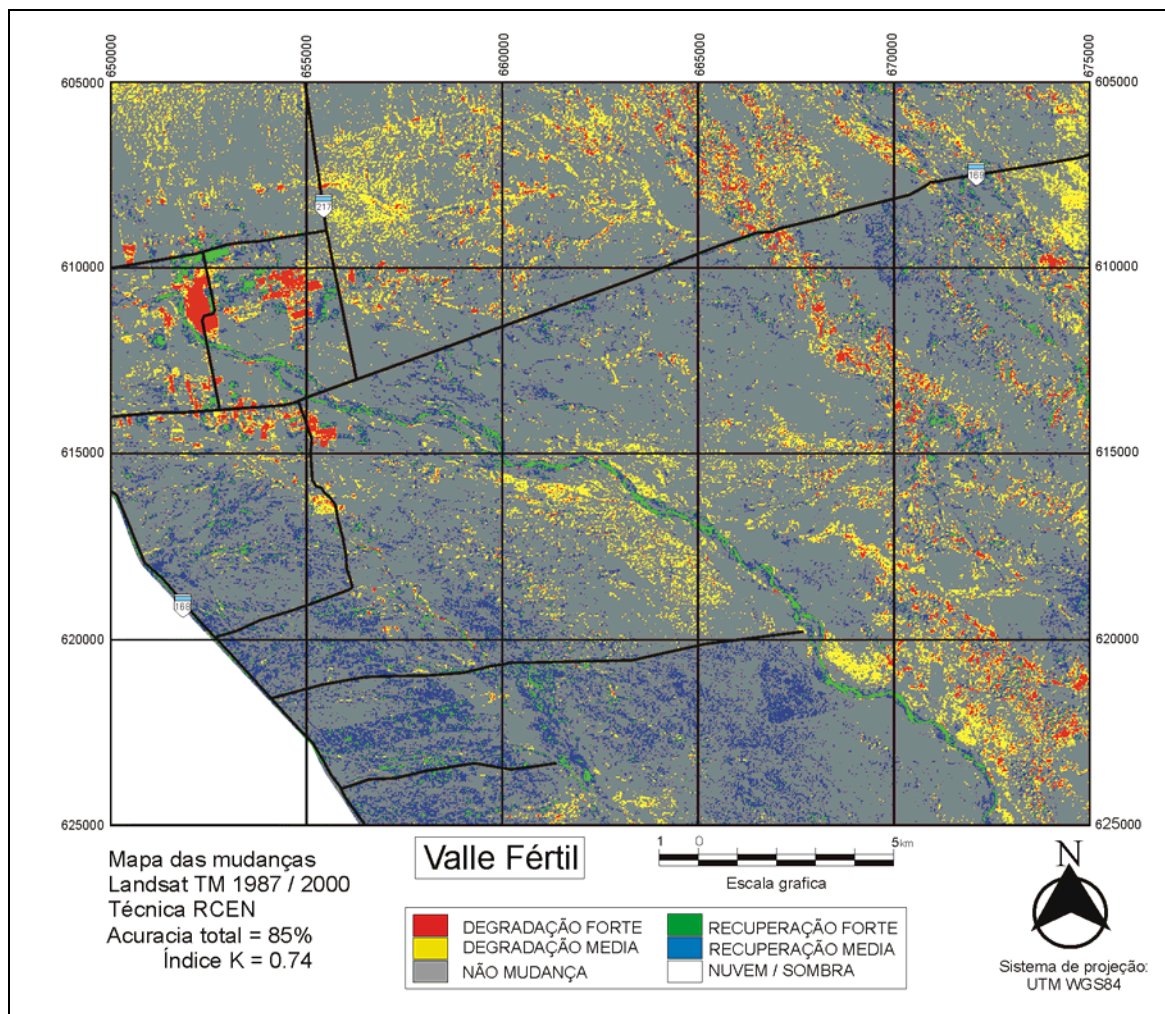


FIGURA 7.11 – Mapa de mudanças do período 1987 / 2000 de Valle Fértil.

No mapa de detecção observa-se um zoneamento entre as classes de recuperação (cores azul e verde) e as classes de degradação (cor amarela e vermelha). No oeste do mapa observa-se uma área agrícola, onde o bosque estava sendo roçado para implantação de novas culturas. Aqui as áreas roçadas neste período (1987/2000) aparecem como degradação forte em vermelho.

No norte e oeste do mapa encontram-se áreas de planície, sem a ocorrência de “cercados”, que são chamados de campos comunitários. Nestes campos a pressão de pastoreio e de extração de madeira é maior que a recomendada para um manejo sustentável. Por esta razão, a degradação é generalizada e geralmente extensiva. A

degradação média é observada em amarelo com um padrão distribuído e a degradação forte em vermelho com um padrão agrupado. Esta última se localiza onde a extração de madeira foi mais intensa, geralmente nas áreas de bosque que acompanham a umidade do solo produzida pelos riachos temporários.

No sudoeste da área se observa um padrão distribuído da classe recuperação (cinza e azul). Isto corresponde a uma área que na última década se encontra em processo de “cercado” e manejo mais racional das pastagens naturais. Nestas terras de pastoreio há indicação do início de um ciclo de recuperação da cobertura vegetal (arbórea, arbustiva e herbácea).

A seguir são analisados alguns casos documentados (um para cada classe temática). A Figura 7.12(a) mostra um trecho de interesse na imagem em composição colorida TM 453. Na análise das classes de mudança (FIGURA 7.12(b)) pode-se observar que a detecção foi sensível à recuperação média e à não-mudança dos campos com novos “cercados”. Isto pode ser observado no sudoeste da área, em cor azul nessa figura. O fluxo do escoamento superficial das águas de chuva pode ser canalizado por voçorocas ou mesmo por obras viárias como pontes (po), produzindo uma diminuição da umidade do solo em algumas áreas (cl) apresentadas na Figura 7.12(a).

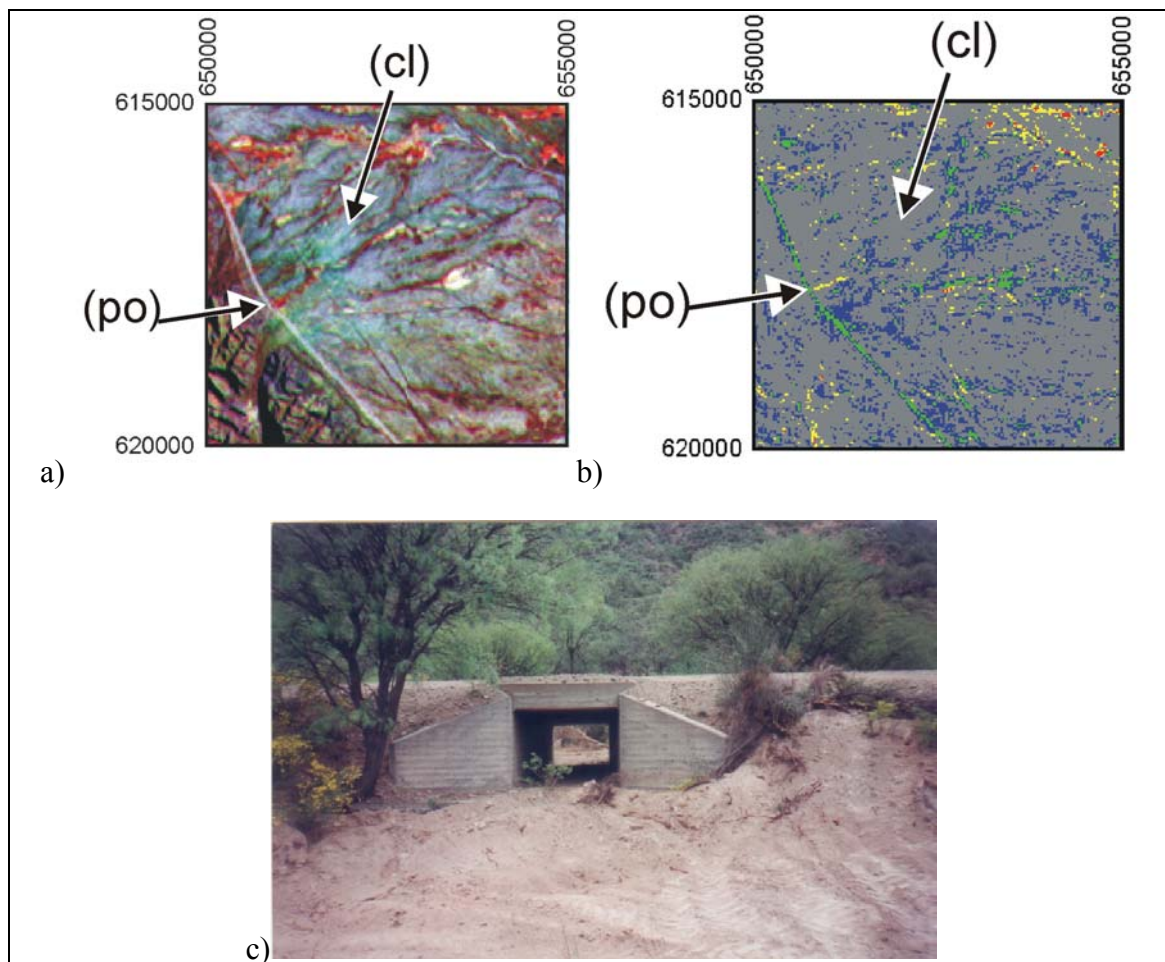


FIGURA 7.12 – Obra viária para escoamento superficial das águas de chuva em área de fisionomia arbórea. Em (a) imagem composição 453; (b) mapa de mudanças; em (c) fotografia na qual se observa a obra viária correspondente ao ponto (po).

As voçorocas canalizam esse escoamento, produzindo mudanças na disposição espacial das plantas, como observado por Puigdefábregas e Puignaire (1999), o que consolida o processo de degradação em partes destas áreas. Neste caso as áreas encontram-se numa zona recentemente cercada na qual a recuperação é generalizada, porém a cobertura vegetal nestas áreas (cl) não está se recuperando (FIGURA 7.12(b)) ou se recupera muito lentamente (não detectada pela imagens). Por esta razão são observadas estas áreas de não-mudança (cl) e recuperação média (azul).

Em outras áreas, como a ilustrada pela Figura 7.13(a,b), ocorre a degradação por extração de madeira para cercados. Essa possui um padrão de grau fino de degradação/não-mudança.

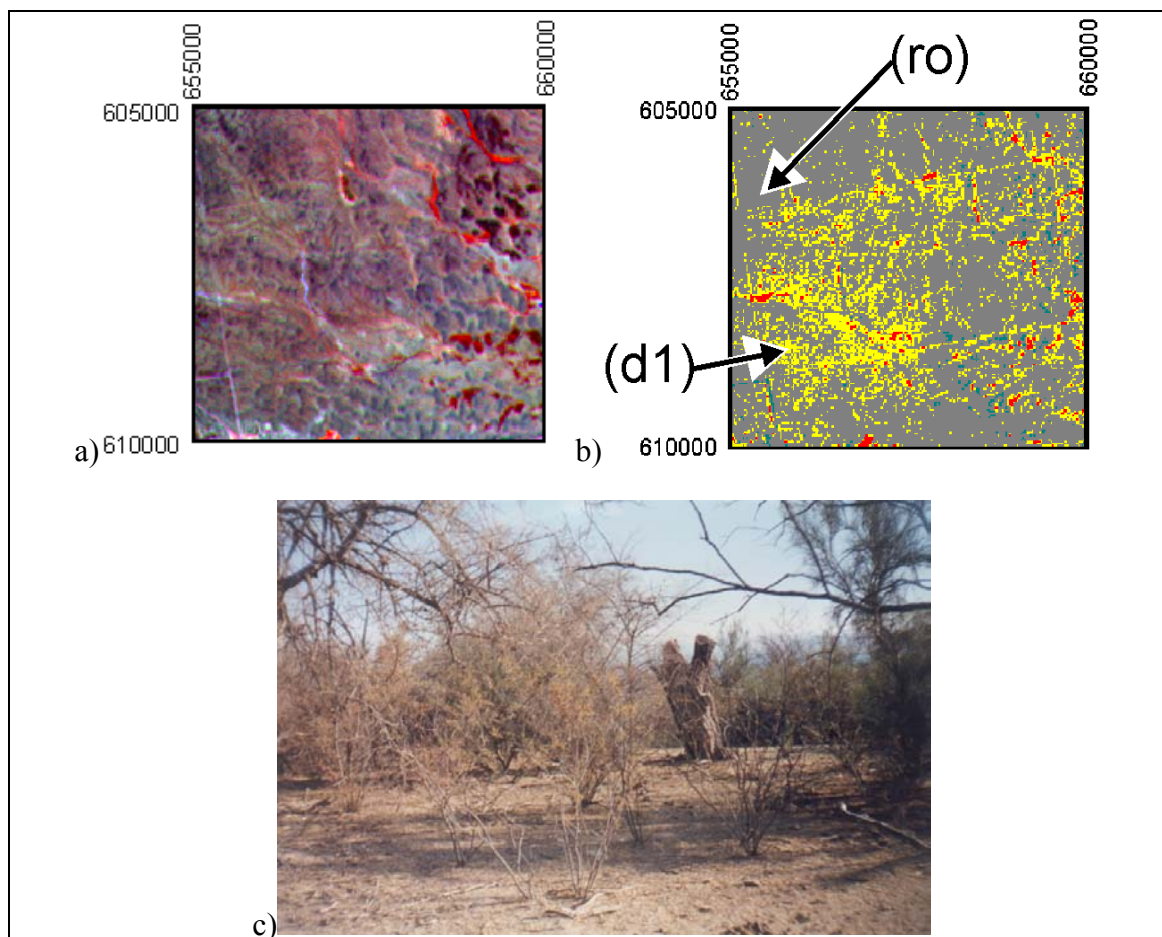


FIGURA 7.13 – Degradação por retirada de madeira, em fisionomia arbórea-arbustiva. Em (a) imagem composição 453; (b) mapa de mudanças; em (c) fotografia na qual se observa o toco da árvore confirmando tratar-se de área de degradação média (d1) e área protegida por cercado em (ro).

A exploração de madeira para cercados exerce pressão sobre todos os indivíduos arbóreos, sadios e não sadios. As árvores de maior porte fornecem mais elementos para a cerca e são exploradas mais intensamente deixando maiores clareiras; as de menor porte fornecem postes menores até ramos para sebe. Na Figura 7.13(c) a superfície do

solo da clareira, com restos de serrapilheira. Este solo apresenta boa penetrabilidade, o que caracteriza um solo brando desenvolvido sob a proteção da cobertura vegetal. Estas características tidas no solo exposto são indicadores úteis para o diagnóstico da degradação ou de formação recente de clareiras. Estas áreas de retirada de madeira podem ser observadas no norte da imagem com alternância regular de tons amarelos e cinzas; degradação média e não-mudança (FIGURA 7.13).

Na Figura 7.14 observa-se uma fisionomia arbóreo-arbustiva degradada, correspondente a área de campos comunitários sem cercados (re), com uma diversidade de espécies arbustivas o que, conjuntamente com outros indicadores, geralmente, indica um processo de degradação atuante de longa data, por superpastoreio e extração de madeira.

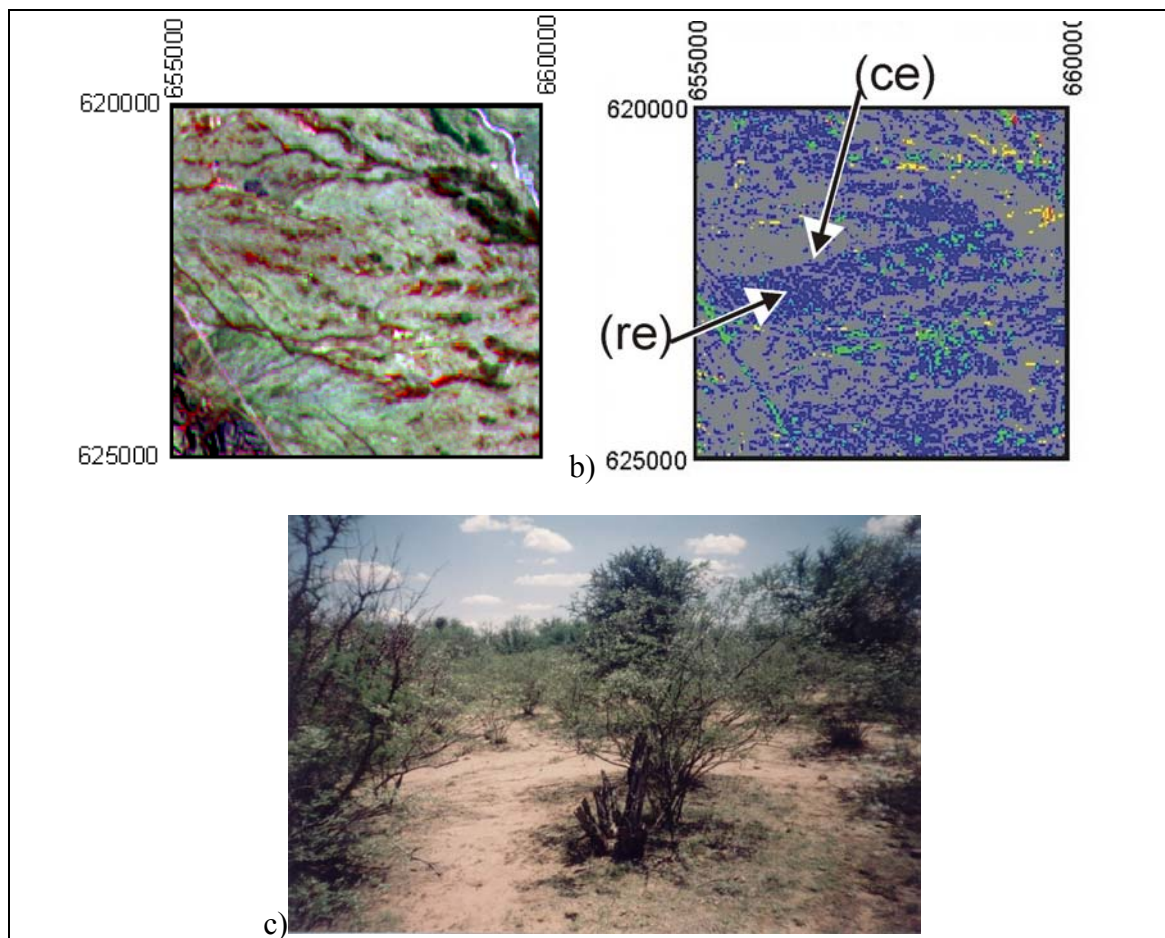


FIGURA 7.14 – Área cercada com padrão regular de uso em fisionomia arbóreo-arbustiva. Em (a) trecho da imagem em composição 453; (b) mapa de mudanças; (c) fotografia da área (re); linha de contraste produzida pela área cercada (ce).

Na Figura 7.15 apresentam-se os casos de mudanças fortes em fisionomia agrícola, que seja de degradação forte (ro) na cor vermelha do mapa de detecção de mudanças (FIGURA 7.15b) ou recuperação forte (cl), assinalada na cor verde.

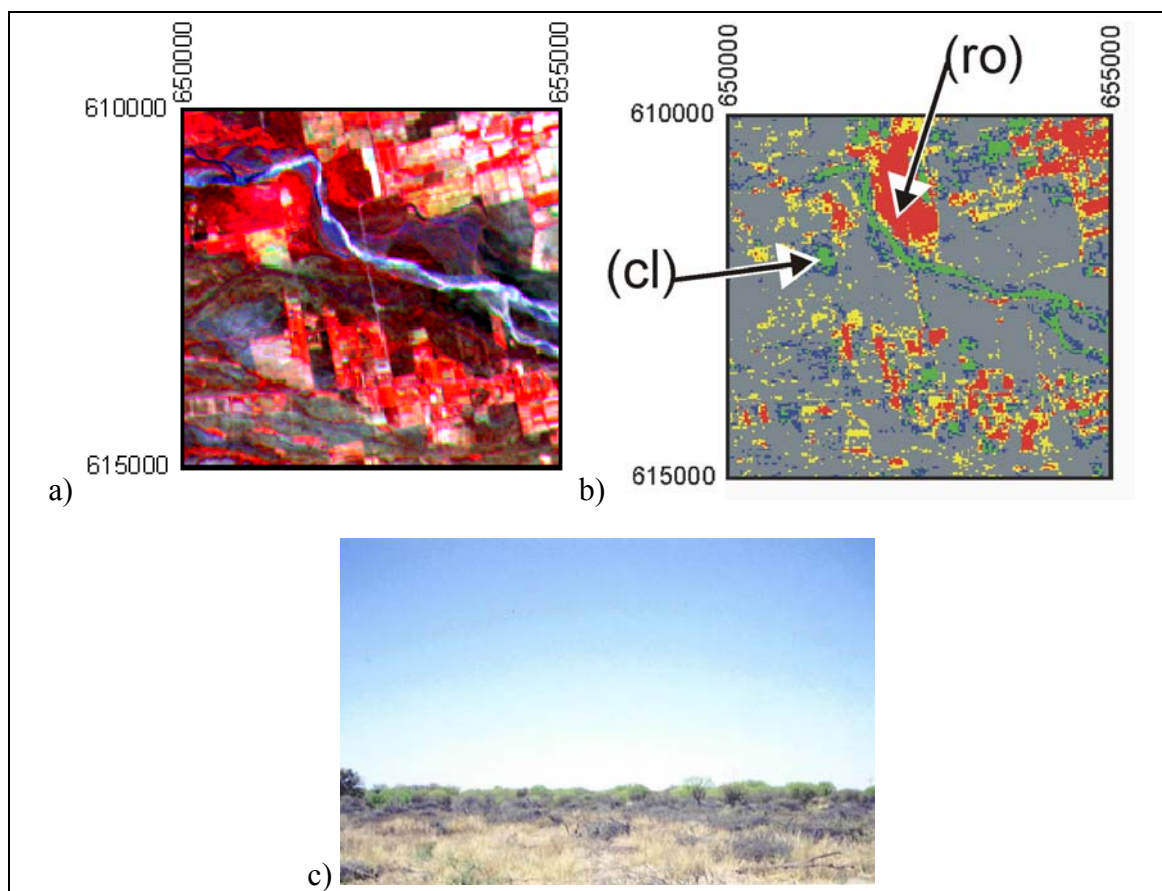


FIGURA 7.15 – Recuperação e degradação forte em área agrícola. Em (a) trecho da imagem em composição 453; (b) mapa de mudanças com degradação forte (ro) e recuperação forte (cl); e (c) fotografia da área roçada (ro).

O sítio (cl) mostrado na Figura 7.15(b) se refere a uma área agrícola antiga, roçada em data anterior à da primeira imagem (do intervalo de detecção), na qual atualmente se encontra uma cultura de plantas frutíferas (pêssego) de porte mediano. O caso do sítio (ro) da Figura 7.15(b) refere-se a uma área de fisionomia arbórea roçada no decorrer do intervalo de detecção investigado, fotografia da Figura 7.15(c).

As feições observadas no mapa de mudanças representaram integralmente as situações observadas no campo. A acurácia do mapa de mudanças na região de Valle Fértil (FIGURA 7.11) foi obtida através da análise Kappa e da matriz de confusão, conforme Tabela 7.1 a seguir.

TABELA 7.1 – Matriz de confusão e índice K.

Supervisão de Campo

		ReFor	ReMed	NaoMud	DeMed	DeFor	Tmapa
Imagem detecção de mudanças	ReFor	7					7
	ReMed		16	3			19
	NaoMud	1	7	71	2		81
	DeMed		1	2	8		11
	DeFor			2		8	10
	TCampo	8	24	78	10	8	128

Acurácia total= 85.94%

Índice K = 0.7540

Variância =0.00017291

O valor de acurácia de 85.94% e do índice K de 0.75 foi considerado conceitualmente como “muito bom”, segundo a categorização de Landis e Koch (1977). As imagens não apresentaram nuvens e nem sombras e os histogramas tiveram formas similares. Assim, a RCEN aplicou uma rotação próxima de 45°, com um ângulo de 44°24’, como visto na Figura 7.10. Um ângulo desta magnitude se aplica quando as imagens apresentam poucas diferenças nas condições de imageamento.

7.6. Conclusões e Recomendações

O delineamento amostral não aleatório estratificado foi apropriado na região de Valle Fértil, permitindo o planejamento da amostragem minimizando o tempo de traslado entre pontos, mediante a rede de estradas em melhor estado de conservação.

A RCEN obteve uma acurácia muito boa e a obtenção de pontos amostrais de não-mudança nas imagens não apresentou dificuldades. Isso, considerando haver uma dinâmica em áreas de bosque sem indicadores de mudanças, o que permitiu obter pontos radiometricamente intermediários apropriados para obter uma formulação regressão

confiável. Esta técnica é recomendada para a detecção de mudanças da vegetação no semi-árido de Valle Fértil embora o critério mais importante seja a falta de qualquer tipo de indicador de mudanças (degradação ou recuperação).

O número de amostras coletadas de degradação ou recuperação média foi definido e ainda pode ser aumentado com a identificação das áreas de contraste temático abrupto produzido pelas cercas. Este contraste se produz nesta área de Valle Fértil pelo pastoreio do gado bovino. Por sua vez, na área de Ouricuri este contraste temático não é tão freqüente, pois o uso é geralmente de caprinos, não sendo comum as áreas cercadas para um manejo apropriado.

A coleta de amostras de degradação e recuperação forte foi simples, realizada em áreas agrícolas, onde as classes são espectralmente mais homogêneas. Desta maneira, as amostras de recuperação foram obtidas em áreas agrícolas antigas, ocupadas por árvores frutíferas como oliveira e pêssego, comum na região de Valle Fértil. Já as amostras de degradação foram obtidas, em antigas áreas de bosque, como as da colônia agrícola de “Los Valencianos”.

Em Valle Fértil, a RCEN eliminou a necessidade de correções atmosféricas, que seriam difíceis de obter pela ausência de corpos de água ou sombras para extrair pixels escuros. Somente poderiam ser feitas correções atmosféricas com modelos mais complexos como o de Hall et al. (1991).

Em relação às observações temáticas no mapeamento, a área de Valle Fértil encontra-se dividida em dois setores bem definidos. O setor nordeste que se encontra numa fase de degradação. E o setor sudoeste em uma fase de recuperação média. O resultado da detecção entre as imagens 1987 e 2000 sugere que o processo de degradação/recuperação está ocorrendo simultaneamente em duas áreas da cena (norte e sul).

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

A metodologia de detecção de mudanças baseada em imagens radiância, com aplicação da técnica RCEN foi considerada bem sucedida para a região do semi-árido. Uma das principais inovações desta metodologia é a maior interação entre os dados do levantamento de campo e o próprio procedimento formulador da técnica digital de detecção de mudanças. Estas interações aconteceram em três instâncias; a primeira no controle propriamente dito da técnica RCEN; a segunda na aplicabilidade da técnica de limiarização e rotulação por agrupamento de amostras e, na terceira e última instância, na avaliação da acurácia temática dos resultados.

Para uma melhor visualização dessas conclusões, estão colocadas a seguir as considerações finais, na mesma seqüência do processo operativo conforme estabelecido nos capítulos deste documento:

- Com relação à montagem do banco de dados georreferenciados: as operações algébricas complexas sobre imagens somente podem ser aplicadas, com sucesso, em produtos cuja informação esteja contida em valores contínuos (números reais); por isso, para qualquer processamento digital de imagens do semi-árido, deve-se em primeiro lugar, fazer a decodificação das imagens (ND) e a posterior transformação nesse modo contínuo;
- Com relação a aplicação das técnicas de referência para detecção de mudanças: na aplicabilidade da técnica ACP como referência, observou-se que suas potencialidades para a detecção de mudanças não estão esgotadas, recomendando-se explorar modificações em sua formulação, sobretudo na melhoria do autocontrole da própria rotação dessa técnica. Neste trabalho foram observados indicadores no espaço da radiância que podem permitir esse autocontrole e, no futuro, beneficiar o desenho de um sistema automático mais operacional de detecção das mudanças, numa ACP transformada;

Com relação ao desenvolvimento de procedimentos de levantamento de campo: o investimento na qualidade das informações de campo, derivadas de *transectos*, descrições fitofisionômicas simples e de pontos observacionais, com cuidadosa análise no gabinete, foi relativamente alto. Por isso, o uso da metodologia adotado (delineamento amostral não aleatório seletivo e técnica de levantamento adaptativa para a amostragem de cada sítio) nesse trabalho, é expressamente recomendada para a região do semi-árido, quando há suficiente histórico da área e um conhecimento antecipado dos processos que ocorrem no local a ser amostrado, para uma otimização de tempo e uso dos recursos, além de uma adequada cartografia da dinâmica de uso e cobertura da terra;

- Com relação à aplicação das técnicas desenvolvidas para detecção de mudanças: o conjunto de testes realizados com as técnicas RCIA e RCEN tendo como técnicas de referência a Diferença simples e a ACP, demonstrou que a técnica de Rotação controlada por eixo de não-mudança – RCEN é a mais recomendada no tratamento de dados da região do semi-árido. Nesse processo aplicativo RCEN, a transformação das imagens detecção de mudanças, do modo contínuo em temático, deve ser feita utilizando a técnica de posicionamento dos limiares por agrupamento de amostras de mudança e não-mudança, com posterior fatiamento e rotulação. A forma e aplicação dos limiares em função da complexidade da paisagem poderia ser revisada para melhorar o desempenho, com estes limiares sendo aplicados no espaço bi-dimensional, com formas curvilíneas, talvez expressando melhor esse aumento da variância da radiometria dos pontos de não-mudança, sobretudo nessas áreas de baixa cobertura vegetal ou de alto albedo, como na região do semi-árido;

- Com relação à análise dos dados e síntese metodológica (área Quixaba): as observações temáticas no mapeamento de Quixaba-PE, para o intervalo de tempo 1984-2001, permitem afirmar de uma maneira generalizada, que o processo de degradação/recuperação na área estava ocorrendo próximo ao equilíbrio. Contudo, alguns setores da área têm, em períodos de detecção mais recentes, apresentado evidências de um maior incremento no nível de degradação. Os mapas de mudanças obtidos pelas técnicas RCEN e RCIA tiveram boa acurácia, embora obtidos com a utilização de imagens sem nenhum tipo de correção atmosférica. Porém, a RCEN foi aquela que apresentou melhor

consistência nos resultados, para qualquer dos períodos de tempo entre imagens, identificando satisfatoriamente as mudanças na cobertura vegetal sem utilizar processamentos digitais complexos;

- Com relação à avaliação da metodologia (estudo de caso Valle Fértil): no mapeamento da área de teste situada na Argentina, foi constatado uma divisão em dois setores bem definidos de degradação e de recuperação média. Esta setorização foi confirmada pelas observações de campo: o primeiro correspondendo às áreas de manejo de campos comunitários; e o segundo, correspondendo às áreas de novos cercados, com conseqüente manejo do uso da terra para recuperar a cobertura vegetal. A aplicabilidade da técnica RCEN nessa área de Valle Fértil mostrou uma adequada acurácia temática na detecção de mudanças.

No decorrer dessa pesquisa não foi alcançado nenhum critério radiométrico para obter uma nova categoria nesse processo de monitoramento, relacionada a estabelecer uma classe temática de mudança “fraca” ou “sutil”. No entanto, nos mapas de detecção de mudanças foram observados alguns padrões de granulometria fina entre áreas de não-mudança e de recuperação ou degradação média. Esses padrões temáticos de granulometria fina ocorrem, principalmente, em áreas de vegetação arbóreo-arbustiva, possivelmente devido às mudanças sutis entre estratos. Investigações futuras para o estabelecimento dessa nova classe “degradação ou recuperação fraca” são recomendadas, baseando-se em uma análise das forças que produzem este tipo de mudança, podendo ser obtida através de um procedimento de “filtragem temática” do mapa de detecção de mudanças, para agrupamento de pixels numa nova classe de mudanças fracas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accioly, L.J.; Oliveira, M.A.; Silva, F.H.; Burgos, N. Avaliação de mudanças no albedo do núcleo de desertificação do Seridó através de imagens do Landsat TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: Fábrica da Imagem, 2001. p. 768-776. 1 CD-ROM.
- Akibode, K. Spatial patterns of land use and land degradation. In: Land use and cover change (LUCC). Open science meeting, 1996, Amsterdam. **Proceedings...** Barcelona: ICC, 1997, p.83-84.
- Aligula, H. M.; Said, M. Y.; Njuguna, E. C.; Leeuw, J.; Skidmore, A. K. Geo-Information for sustainable rangeland management: a case study of the arid and semi-arid lands in Kenya. In: International Conference on Geo-Information for Sustainable Land Management, 2., 1997 Enschede,. **Proceedings...** Stocolm: Storf Metium, 1997. 1 CD-ROM.
- Almeida, S. A.; Silva, A. F.; Melo, E. M.; Moreira, J. C.; Ortiz, J. A.; Amaral, S.; Soares, J. V.; Alves, D. S. Mapeamento de cobertura da terra utilizando técnicas de processamento de imagens na região de Ariquemedes (RO-BR) com ênfase às florestas secundárias. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador. **Anais...** São Paulo: Multimidia, 1996. 1 CD-ROM.
- Aronoff, S. The map accuracy report: a user's view. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.48, n.8, p.1309-1312, Aug 1982.
- Art, H.W. **Dicionário de ecología e ciências ambientais**. São Paulo: Melhoramentos. 1998. 584p.

- Asner G.P.; Wessman C.A.; Schimel D.S. Heterogeneity of savanna canopy structure and function from imaging spectrometry and inverse modeling. **Ecological applications**, v.8, n.4, p.1022-1036, Oct 1998.
- Asner, G.P.; Wessman, C.A.; Bateson, C.A.; Privette, J.L. Impact of Tissue, Canopy, and Landscape Factors on the Hyperspectral Reflectance Variability of Arid Ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v.74, n.1, p.69-84, Feb 2000.
- Babayev, A.M. An experiment using remote sensing to monitor dynamics and trend in desert geosystems. **Mapping Science and Remote Sensing**, v.28, n.3, p.229-235, June 1991.
- Banon, G. J. F. **Análise por componentes principais**: texto de apoio para as aulas do IV Curso Internacional. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992. 14p.
- Baumgardner, M.F.; Kristof, S.J.; Johannsen, C.J.; Zachary, A.L. Effects of organic matter on the multiespectral properties of soils. **Proceedings of the Indiana Academy of Science**, v.1, n.79, p.413-422, Jan 1970.
- Bernstein, R. Image geometry and rectification. In: R.N. Colwell, ed., **Manual of Remote Sensing**, 2nd ed. Virginia: American Society of Photogrammetry, p.873-922, 1983.
- Bied-Charreton, M.; Cazaux, J. Economic interest of remote sensing techniques. In: Remote Sensing for Development International Conference, 1989, Berlin. **Proceedings...** Berlin: Albertz and Tauch, 1989. p.37-56. (ISBN 975-517-200-X)
- Biurrun, F.N. **La vegetación de los llanos de La Rioja**. In: Kugler, E.F. El deterioro del ambiente en la Argentina, p.200-204, Buenos Aires: FECIE. 1998.

- Bowker, D.E.; Davis, R.E. Influence of atmospheric aerosols and desert reflectance properties on satellite radiance measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, n.16, p.3105-3126, Nov 1992.
- Boyd, D.S.; Foody, G.M.; Curran, P.J.; Lucas, R.M.; Honzak, M. An assessment of radiance in Landsat TM middle and thermal infrared wavebands for the detection of tropical forest regeneration. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.2, p.49-261, Jan 1996.
- Braun-Blanquet, J. **Fitosociología**. bases para el estudio de las comunidades. Madrid, España: Blume, 1979. 820p.
- Bruzzone, L.; Serpico, S.B. Detection of changes in remotely-sensed images by the selective use of multi-spectral information. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.18, p.3883-3888, Dec 1997.
- Bruzzone, L.; Prieto, D.F. Automatic Analysis of the Difference Image for Unsupervised Change Detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.38, n.3, p.2419-2422, Mar 2000.
- Burrows, C. J. **Process of vegetation change**. London: Unwin Hyman, 1990. 552p.
- Byrne, G. F.; Crapper, P.F.; Mayo, K.K. Monitoring land cover change by principal componentes analysis of multitemporal Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v.10, n.3, p.175-185, Nov 1980.
- Cabrera, A.L.; Willink, A. **Biogeografía de América Latina**. Washington: OEA, 1973. 117p.
- Cabrera, A.L. **Regiones fitogeográficas argentinas**. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Buenos Aires: Acme, v.2, n.1, 1994. 85p.

Campbell, J.B. **Introduction to remote sensing**. 2nded. New York: The Guilford Press, 1996. 622p.

Carrilho, J. M. Z. **Detecção de mudanças da cobertura do terreno em uma região do cerrado**. 1995. 110p. (INPE-5979-TDI/575-96). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

Carvalho, V. C. **Structure et dynamique de la vegetation de milio tropical semi-aride. La Caatinga de Quixabá (Pernambouc, Brésil) du terrain a l'analyse des données MSS/Landsat**. 1986. 332p. (INPE-4049-RPE/524). Tesis (Doctorado em Geografia) - Universidad de Toulouse. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

CCRS - Canada Center of Remote Sensing. **Fundamentals fo Remote Sensing**. 2001. Disponível em: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/ref/index.html> Acesso em: 19 maio 2001.

Changyao, W. Desertification reserch using remote sensing and geographical information system. In: **International Symposium of Remote Sensing and Global Environmental Change**, 7-11 Sept 1993, Austria. **Proceedings...** Vienna: Bosgo, 1993. p.650-656. (ISBN 976-519-202-X)

Chavez, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.24, n.3, p.459-479, Apr 1988.

Chavez, P.S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images, **Photogrammetry Engineering & Remote Sensing**, v.55, n.9, p.1285-1294, Sept 1989.

Chavez, P.S.; MacKinnon, D.J. Automatic detection of vegetation changes in Southwest United States using remotely sensed images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.60, n.5, p.571-583, May 1994.

Chavez, P.S. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved, **Photogrammetry Engineering & Remote Sensing**, v.62, n.9, p.1025-1036, Sept 1996.

Chi, H. Practical atmospheric correction of NOAA-AVHRR data using the bare-sand soil line method. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.17, p.3369-3379, Sept 2003.

Choudhury, B.J. Multispectral satellite observations for arid land studies. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.47, p.101-126, Mar 1992.

Chuvieco, E. **Fundamentos de teledección espacial**. Madrid: Ediciones real, 1990. 551p.

Cohen, W.B. Response of Vegetation Indices to Changes in Three Measures of Leaf Water Stress. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.57, n.2, p.195-202, Feb 1991.

Conese, C.; Maracchi, G.; Miglietta, F.; Maselli, F.; Sacco, V. M. Forest classification by principal component analyses of TM data. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, n.10, p.1597-1612, Oct 1988.

Congalton, R.G. Calculus of Kappa. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.1, p.35-41, Jan 1991.

Congalton, R.G.; Green, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practice**. Mapping sciences series. New York: CRC Press Inc., 1999. 98p.

- Coppin, P.R.; Bauer, M.E. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. **Remote Sensing Reviews**, n.13, p.207-234, Sept 1996.
- Coppin, P.; Jonckheere, I.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Lambin, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**. v.25, n.9, p.1565-1596, Apr 2004.
- Cottam, G.; Curtis, J.T, The use of distance measure in Phytosociological sampling. **Ecology**, v.37, n.3, p.451-460, Nov 1956.
- Cottam, G.; Curtis, J.T. A Method for Making Rapid surveys of Woodlands by Means of Pairs of Randomly Selected Trees, **Ecology**, v.30, n.1, p.101-104, Jan 1956.
- Cracknell, A. P.; Hayes, L. W. **Introduction to remote sensing**. London: Taylor & Francis, 1991. 294p.
- Crosta, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1993. 189p.
- Dai X.L.; Khorram S. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.5, p.1566-1577, May 1998.
- Dalmaso, A.; Marquez, J. Vegetación actual de ambientes del cuaternario de San Juan. In: Sintesis del Cuaternario de la Provincia de San Juan, 1., 1999, San Juan. **Anais...** San Juan: UNSJ, 1999. 1 CD-ROM.
- Demaio, P.; Karling, U.O.; Medina, M. **Árboles nativas del centro de Argentina**. Buenos Aires: Colin Sharp, 2002. p.212.

- Dregne, H.E. Land degradation: assessment and monitoring. In: International Conference of Task Force on Land Degradation, 3.(ICTFLD), Timbuctú, Etiopia. **Proceeding...**, Timbuctú: ICTFLD, 1998. 1 CD-ROM
- Dregne, H.E. The challenges of land degradation in the 21 st century. In: International Conference on Land Degradation, 2.(ICLD), 25-29 January, 1999,, Khon Kaen, Thailand. **Proceedings...**, Khon Kaen: ICLD, 1999. 1 CD-ROM.
- Drumond, M.A.; Lima, P.C.F.; Souza, S.M.; Lima, J.L.S. **Sociabilidade das espécies que ocorrem na caatinga**. Petrolina: CPATSA/EMBRAPA, 1979. 14p. (CPATSA-CT- 56).
- Duque, J. G. **O Nordeste e as lavouras xerófilas**. Mossoró: Centro Gráfico Senado Federal, 1980. 332p.
- Dwivedi, R.S.; Kumar, A.B.; Tewari, K.N. The utility of multi-sensor data for mapping eroded lands. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.11, p.2303-2318, July 1997.
- Eastman, J.R.; Fulk, M. Long sequence time series evaluation using standarized principal components. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.59, n.6, p.991-996, June 1993.
- Eberhardt, K.R. Survey sampling methods. In: Wadsworth, H.M.(ed.) **Handbook of statistical methods for engineer and scientists**. New York: McGraw-Hill, 1990. cap.14, p.901-940.
- Egler, C.A.G. Recent Changes in Land use and Land Cover in Brazil. In: Hogan, D.J.; Tolmasquim, M.T. (ed.) **Human dimensions of global environmental change**. bBrazilian perspectives. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2001. cap. 7, p. 211-239.

Elmore, A.; Hendrey, G.; McNulty, S.G. Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.73, n.1, p.87-102, Out 2000.

Empresa Brasileira de Pesquisa na Agropecuária (EMBRAPA) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999. 180 p.

Elvidge, C.D.; Ridgeway, D.Y.; Weerackoon, D.; Lunetta, R.S. Relative Radiometric Normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) Data using an Automatic Scattergram Controlled Regression. **Photogrammetric Engineering & Remote sensing**, v.61, n.10, p.1255-1260, Out 1995.

Escadafal, R.; Giraud, M.; Courault, D. Munsell Soil Color and Soil Reflectance in the Visible Spectral bands of Landsat MSS and TM data. **Remote Sensing of Environment**, v.27, n.1, p.37-46, Jan 1989.

Escadafal, R. Simple remotely sensed land surface parameters: a rationale for land degradation monitorin in arid mediterranea areas. In: Hill, J.; Peter, D. (ed.) **The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin**. Luxemburgo: Official Publications of European Communities, 1996. cap.8, p.201-208.

Faria, C. M. B. **Práticas que favorecem a capacidade produtiva do solo na agricultura de sequeiro do semi-árido brasileiro**. Petrolina: CPATSA/EMBRAPA, 1992. 30p. (CPATSA-CT-28)

Fung, T.; LeDrew, E. The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices. **Phogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n.10, p.1449-1454, Out 1988.

- Fung, T. An assessment of TM imagery for land-cover change detection. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v.28, n.4, p.681-694, Out 1990.
- Garcia, Z. E.; Salmuni, G.; Marquez, J. A.; Murua, F. A.; Maldonado, F. D.; Ortiz, H. P.; Pastran, S. G.; Bracco, A. C.; Varela, S. T.; Lund, M. I. **La Desertificacion en el Gran Bajo Oriental del Departamento de Valle fértil, San Juan – Argentina.** Estado de situacion y propuestas. San Juan: UNSJ-CICITCA, 1996. 324p. (Informe UNSJ-CICITCA/21-1996).
- Gausman, H. W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.11, n.51, p.1725-1734, Mar 1985.
- Gillespie, A. R. The intersection method of adjusting image data. **Remote Sensing of Environment**, n .42, p.147-155, Sept 1992.
- Gillette, D. A. **Thereshold velocities for dust production.** In: Physic of desertification. P.322-326. Dordrech: Kluwer Academic Publisher, 1986.
- Goeffrey, M. H. Detecting change in grasslands using measures of spatial dependence whit Landsat TM data. **Remote Sensing of Environment**, v.46, n.4, p.223-234, Mar 1997.
- Goldsmith, F.B.; Harrison, C.M. Description and analysis of vegetation. In: Moore, P.D.; Chapman, S.B.(ed.) **Methods in plant ecology.** Oxford: Blackwell Scientific Publications, p.437-524, 1986.
- Gomes, P.J.; Velho, C.J. **Computação grafica de imagens.** Campinas: IMPA, 2002. 342p.
- Green, K.; Kempla, D.; Lackey, L. Using remote sensing to detect and monitor land cover and land use change. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.60, n.3, p.331-337, Mar 1994.

- Grace, J. **Relaciones plantas-ambiente**. Madrid: Oikos-tau. 1992. p.121.
- Guangwei, C. Land Degradation Approach – Methodology and Practice. [CD-ROM] In: International conference on geo-information for sustainable land management. Enschede, 1997. **Proceedings...** Beschreibung: Multimedia, 1997. 1 CD ROM.
- Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996. 372p.
- Guyot, G.; Gu, X. Effect of radiometric corrections on NDVI determined from SPOT/HRV and Landsat/TM data. **Remote Sensing of Environment**, v.49, n.3, p.169-180, Sept 1994.
- Haken, H. **Formulas del exito en la naturaleza**. Barcelona: Salvat, 1986. 221p.
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickenson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v.11, n.3, p.461-484, Dic 1999.
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.1, p.11-27, Feb 1991.
- Hanan, N. Land use and land cover change in the Sahel and effects on regional climate. In: Land use and cover change (LUCC). Open science meeting, 1996, Amsterdam. **Proceedings...** Barcelona: ICC, 1997, p.85-87.
- Hare, F. K. **Sequia, Variacion climatica y desertificacion**. Ginebra: Organizacion Meteorologica Mundial, 1975. 35p.

Hill, J.; Sturm, B. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, n.7, p.1471-1491, Dec 1991.

Hill, J.; Sommer, S.; Mehel, W.; Megier, J conceptual framework for mapping and monitoring the degradation of Mediterranean ecosystems with remote sensing. In: Hill, J.; Peter, D. The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin. State of the art and future research, p.23-43 Luxemburgo: Official Publications of European Communities, 1996.

Hoffer, J. Quaternary history of tropical America. In Whitmore, T.C.; Prance, G.T.(ed.) **Biogeography and quaternary history in tropical America**. Oxford: Clarendon, 1987. cap.14, p.567-598.

Huete, A.R.; Jackson; D.F. Post spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, v.17, n.1, p.37-53, Feb 1985.

Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, n.3, p.295-309, Apr 1988.

Hutchinson, C. F. Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.2, p.123-130. Feb 1982.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: FIBGE, 1992. 92p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Estatística e biometria**. Série Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: FIBGE, 1997. 87p.

- Igbokwe, J.I. Geometrical processing of multi-sensoral multi-temporal satellite images for change detection studies. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n.6, p.1141-1148, Apr 1999.
- Jensen, J.R. **Introductory digital image processing**. a remote sensing perspective. New Jersey: Prentice Hall. 1996. 318p.
- Jeffers, J.N.R. **Modelos en ecología**. Barcelona: Oikos-tau, 1991. 98p.
- Jiaju, L. Development of principal component analysis applied to multitemporal Landsat TM data. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, n.12, p.1895-1907, Dec 1988.
- Joria, P.E.; Ahearn, S.C. A comparison of the SPOT and Landsat thematic mapper satellite system for detecting gypsy moth defoliation in Michigan. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.57, n.12, p. 1605-1612, Dec 1991.
- Karlin, U., Catalán, L. Y Coirini, R. **La Naturaleza y el hombre en el chaco seco**. Salta: GTZ, 1994. 163 p. (GTZ-RE-PRO56-94)
- Karnieli, A.; Kaufman, Y.J.; Remer, L.; Wald, A. AFRI – Aerosol free vegetation index. **Remote Sensing of Environment** , v.77, n.1, p.10-21, Jan 2001.
- Kazmierczak, M.L. **Índice de vegetação derivado do NOAA/AVHRR: análise da sazonalidade da cobertura vegetal em região de clima semi-árido (caatinga)**. Fortaleza: FUNCEME, 1993. 106p.
- Kelly, B.O.; Howard, I.; Devitt, M.; Gordon, I.O.; Yates, H.W. **Imaging and non imaging sensor**. Em: Lowe, D.S. (ed.) **Manual of Remote Sensing**. New York: Falls Church, 1975. cap.15, p.388-402.
- Kiesling, R. **Flora de San Juan**. v.1, Buenos Aires: Vazques Mazzini Ed. 1994. 350p.

- Kiesling, R. **Flora de San Juan**. dicotiledóneas dialipétalas. Buenos Aires: Estudio Sigma. 2003. 258p.
- Kumar, R. **Radiation from plants-reflection and emission: a review**. Research Project n.5543. Lafayette: Purdue Research Foundation, 1972. 88p.
- Küchler, A. W.; Zonneveld, I. S. Floristic Analysis of vegetation. In: Lieth, H. (ed.) Handbook of Vegetation Science. **Vegetation mapping**, v.10, p.51-80. Stocolm: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Küchler, A. A Physionomic and Structural Analysis of vegetation. In: Lieth, H. (ed.) Handbook of vegetation science. **Vegetation Mapping**, v.10, cap.4, p.37-50. Stocolm: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Landis, J.; Koch, G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometric**, v.33, p.154-174. Jan 1977.
- Nasa. Disponível em: http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html. Acesso em: Março 2002.
- 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. p.48-60.
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3 ed. New York: John Wiley, 1994. 750p.
- Lillestrand, R.L. Techniques for change detection. **IEEE Transactions on Computers**, v.21, n.7, p.655-659, Ago 1972.

- Lima, D.A. **Plantas das caatingas**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1989. 286p.
- Lunetta, R.; Congalton, R.; Frenstermaker, L.; Jensen, J.; McGwire, K.; Tinney, L. Remote Sensing and geographic information system data integration: error sources and research issues. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.57, n.6, p. 677-687, June 1981.
- Lunetta, R.S.; Johnson, D.M.; Lyon, J.G.; Crotwell, J. Impacts of imagery temporal frequency on land-cover change detection monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v.89, n.4, p.444-454, Ago 2004.
- Macleod, R.D.; Congalton, R.G. A Quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring Eelgrass from remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.64, n.3, p.207-216, Mar 1998.
- Maldonado, F.D. **Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro: Quixaba – PE, Brasil**. (INPE-7180-TD/680), 1999. 116p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: INPE, 1999.
- Maldonado, F.D.; Santos, J.R.; Carvalho, V.C. Caracterización de cambios e influencia climática sobre la cobertura vegetal en el semiárido brasileño mediante Análisis por Componentes Principales (ACP). **Revista de Teledetección**, n.13, p.26-36, jun 2000a.
- Maldonado, F.D.; Martinelli, M.; Salinas, N.G. “Mapeamento de unidades fisionômicas de vegetação no Chaco Árido da Argentina utilizando Imagens Landsat TM”. In: Seminário de atualização em Sensoriamento Remoto y Sistemas de Informação Geográfica aplicados a Engenharia Florestal, 4., 2000, Curitiba, **Anais...** Curitiba: Iratí, 2000b. 1 CD-ROM.

- Maldonado, F.D.; Carvalho, V.C.; Santos, J.R. Change Detection in land use and land cover with remote sensing: degradation indicators at sub-regional level. International Conference on Land Degradation, 3., 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Miditec, 2001. 1 CD-ROM.
- Maldonado, F.D.; Santos, J.R.; Carvalho, V.C. Rotação espectral controlada como alternativa da Análise por componentes principais para detecção de mudanças em área do semi-árido. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: Fábrica da Imagem, 2001b. 1 CD-ROM.
- Maldonado, F.D.; Santos, J.R.; Carvalho, V.C. “Land use dynamics in the semi-arid region of Brazil (Quixabá-PE): characterization by principal components analysis”. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.23, p.5005-5013, Dec 2002.
- Maldonado, F.D.; Carvalho, V.C. Indicador de degradação a escala sub-regional para detecção de mudanças na cobertura das terras com Sensoriamento remoto. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: Fábrica da Imagem, 2003. p.456-469. 1 CD-ROM.
- Maldonado, F.D. Apresentação do ATRAN/SIREI - Módulo de Administração de Transectos do Sistema de Rotação Radiométrica de Imagens Digitais. São José dos Campos: INPE. (no prelo).
- Maldonado, F.D.; Carvalho, V.C.; Sousa, C.L.; Martinelli, M.; Pinheiro, O.L.; Vieira, F. Determinación de la longitud de Transecta para relevamiento Fisonómico-estructural de la vegetación del semiárido para suministrar datos a las Técnicas de Percepción Remota orbital. **Multequina Latin American Journal of Natural Resources**, n.13, p.98-112. Mendoza: IADIZA/CONICET, 2004.
- Maldonado, D.F.; Martinelli, M.; Carvalho, V.C. **Innovaciones y mejoramientos de las técnicas de detección de cambios en la cobertura vegetal en regiones semi-áridas**. In: Disperatti, A.; Santos, J.R.(ed.) Sensoriamento remoto e sistemas de

- informações geográficas aplicados à engenharia florestal. Curitiba: UFP, 2004. p.61-69.
- Markham, B.L.; Barker, J.L. Radiometric properties of US processes Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environment**, v.22, n.1, p.39-71, Jun 1987.
- Martinez Carretero, E.B. **El dinamismo de la vegetación y la desertificación.** detección y control de la desertificación. Mendoza: IADIZA. 1987. 169p.
- Marquez, J.; Pastran, G.M.; Ortiz, S.G.; Monetta, H.P. ; Alcober, B.P. Estado de situación del Llano forestal del Sector Norte (San Agustin - Dpto. Valle Fértil). Mapeo de la fisonomía actual. **Informes Flora Museo FCEFYN**, n.14, p.1-136, 1998.
- Mather, P.M. **Computer processing of remotely-sensed Images: an introduction.** New York: John Wiley & sons. 1987. 352p.
- Matteucci, S.D.; Colma, A.; Miranda, F. **Metodología para el estudio de la vegetación.** Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington: OEA, 1982. 163p.
- Más, J.F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n.1, p.139-152, Jan 1999.
- Milton, O.; Smith, S.L.; Ustin, J.B; Adams, J.B; Gillespe, A.R. Vegetation in Deserts I: A regional measure of abundance from multiespectral images. **Remote Sensing of Environment**, v.31, n.1, p.1-26, Jan 1990a.
- Milton, O.; Smith, S.L.; Ustin, J.B; Adams, J.B; Gillespe, A.R. Vegetation in Deserts II: Environmental influences of regional abundance. **Remote Sensing of Environment**, v.31, n.1, p.27-52, Jan 1990b.

- Minetti, J.L. Regimen térmico de San Juan. **Informe técnico CIRSAJ-CONICET**, v.29, n11, p.14-20, nov 1988.
- Moore, P.D.; Chapman, S.B. **Methods in plant ecology**. London: Blackwell Scientific, 1990. 589p.
- Morello, J. ; Sancholuz, C.A.; Blanco, G. Estudio macroecológico de los Llanos de la Rioja. **Suplemento IDIA/Mendoza**, n.34, p.242-248, 1977.
- Mulders, M.A.; Epema, G.F. The thematic mapper: a new tool for soil mapping in arid areas. **ITC Journal**, n.1, p.24-29, Mar 1986.
- Myers, V. I. Remote sensing application in agricultural. In: Cowel, R.N. (ed.) **Manual of remote sensing**. Falls Church: ASP, 1983. v.2, cap. 33, p.2111-2228.
- Negreiros Bessa, M. **A macambira (Bromelia forrageira)**. Recife: EMPARN, 1982. 135p.
- Ortiz, S.G.; Pastran, G.M.; Murua, A.F.; Bracco, A.I.; Sanchez, V.H.; Marquez, J.; Allende, M. **Inventario y diagnóstico de los bosques de Prosopis sp. (Algarrobo) de la Provincia de San Juan II: Sector Sur (Dpto. Caucete y 25 de Mayo) Sec. Norte (Dpto. Valle Fértil)**. San Juan: UNSJ, 1993. 42 p. (MCN-12-93/RT).
- Pastran G.M.; Ortiz, S.G.; Marquez, J.; Murua, A.; Allende, M.; Bracco, A.I.; Caputo, R. Comunidades vegetales de Valle Fértil – sector sur: Marayes-San Agustín. **Ciencias FCFN/UNSJ**, v.1, n.2, p.83-94, Ago 1992.
- Paton, T. R. **The formation of soil material**. London: George Allen & Unwin, 1978. 145p.

Perpiñal, A.; Balzarini, M.; Catalan, L.; Pietrarelli, L.; Karlin, U. Edad de culminación del crecimiento en *Prosopis flexuosa* D.C. en el Chaco Arido argentino.

Investigación Agraria, v.4, n.1, p.45-55, Fev 1995.

Pereira, I.M.; Andrade, L.A.; Costa, J.R.M.; Dias, J.M. Regeneração natural em um remanente de caatinga sob diferentes níveis de perturbação, no agreste paraibano.

Acta botanica brasileira, v.15, n.3, p.413-426, Nov 2001.

Perumal, P.; Rao, S.V.K.; Bhaskar, N.U. A synergetic approach towards sustainable land resources management using remote sensing and GIS techniques – an indian experience in the semi-arid tropics under the national project. In: International Conference on Geo-information for Sustainable Land Management, 1., 1997, Enschede. **Proceeding...** Stocolm: Multimidia, 1997. 1 CD-ROM.

Pickup, G.; Chewings, V.H. Identifying and measuring land degradation processes using remote sensing. In: Hill, J.; Peter, D.(ed.) **The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin**. state of the art and future research. Bruselas: OPEC, 1996. p.135-147.

Pickup G, Bastin GN, Chewings V.H. Identifying trends in land degradation in non-equilibrium rangelands. **Journal of Applied ecology**, v.35, n.3, p.365-377, Nov 1998.

Pinker, R. T.; Karnieli, A. Characteristic spectral reflectance of a semi-arid environment. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, n.7, p.1341-1362, May 1995.

Pons, X.; Solé-Sugrañes, L. A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.48, n.2, p.191-204, June 1994.

- Price, G.C. Calibration of Satellite radiometers and the comparison of vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.52, p.218-230, July 1995.
- Prince, S.D. Measurement of canopy intercept of solar radiation by stands of trees in sparsely wooded savanna. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.12, p.1747-1766, Nov 1987.
- Puigdefábregas, J.; Puignaire, F.I. Plant survival in Arid Environments. In: Puignaire, F.I.; Valladares, F.(ed.) **Handbook of functional ecology**. New York: Marcel Dekker, 1999. cap.6, p.381-406.
- Ray, T.W.; Murray, B.C. Nonlinear mixing in desert vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.55, n.1, p.59-64, Jan 1996.
- Reis, A.C. **Clima da caatinga**. Rio de Janeiro: Acad. Brasileira de Ciências, v.61, n.48, jan. 1996. 335p.
- Richards, J. A. **Remote Sensing digital image analysis: an introduction 2.ed.** Camberra: Springer-Verlag, 1993. 340p.
- Rizzini, C.T. **Tratado de fitogeografia do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 1976. 328p.
- Robinove, C.J.; Chavez, P.S.; P.S.; Gehring, D; Holmgren, R. Arid land monitoring using Landsat albedo difference images. **Remote Sensing of Environment.**, v.11, n.1, p.133-156, Mar 1981.
- Robinove, C.J. Computational with physical values form Landsat digital data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.5, p.781-784, 1982.
- Sader, S.A.; Winne, J.C. RGB-NDVI colour composite for visualizing forest change. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, n.16, p.3055-3067, Nov 1992.

- Sá, I.B. **Aplicações da abordagem multiestágio em sensoriamento remoto para mapeamento da vegetação de caatinga: estudo de caso**, Petrolina, PE. 1990. 178p. (INPE-5280-TDI/450). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1991.
- Sá, I.B.; Fotius, G.A.; Riché, G.R. Degradação ambiental e reabilitação natural no trópico no trópico semi-árido brasileiro. Conferência nacional e seminário latino-americano da desertificação, 1., 1994, Fortaleza. **Anais....** . Fortaleza: CONSLAD, 1994. 1 CD-ROM.
- Santos, J.R.; Maldonado, F.D.; Graca, P.M.L. Imagens CBERS: uma nova ferramenta para subsidiar estudos de mapeamento e monitoriamento ambiental. In: Disperatti, A.; Santos, J.R.(ed.) **Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal**, p.128-137. Curitiba: UFP, 2004.
- Sarmiento, G. The dry plant formations of South America and their floristic connections. **Journal of Biogeography**, n.2, p.233-251, July 1975.
- Schowengerdt, R.A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 2 ed. New York: Academic Press, 1997. 522p.
- Shoshany, M., P. Kutiel, H. Lavee y M. Eichler. Remote sensing of vegetation cover along a climatological gradient. **ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing**, n.49, p.2-10, Jan 1994.
- Singh, A. Change Detection in the Tropical Forest Environment of Northeast India using Landsat. In: _____. **Remote Sensing and Tropical land management**. New York: John Wiley & Son. 1986. cap.8, p.567-679.
- Singh, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v.10, n.6, p.989-1003, June 1989.

- Sirtoli, A. E. **Detecção da expansão de área de mineração através de técnicas de sensoriamento remoto**. 1998. 98p. (UFP-546-DM) Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1998.
- Slater, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems**. New York: Addison - Wesley, 1980. 574 p.
- Sobrinho, J. O grave problema ecológico da desertificação. In: **Estudos Nordestinos de Meio Ambiente**. Recife: Massangana, 1986. p.128-146.
- Stow, D.A.; Collins, D.; McKinsey, D. Land use change detection based on multi-date imagery from different satellite sensor systems. **Geocarto International**, v.5, n.3, p.3-12, Set 1990.
- Story, M.; Congalton, R. Accuracy assessment: A user's perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v.53, n.3, p.397-399, Mar 1986.
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M.F. **Physicochemical, site, and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils**. West Lafayette: Purdue University, 1980. (LARS Technical Report 111679).
- Strassburger, E. **Tratado de botânica**. 32 ed. Barcelona: Omega. 1993. 1097p.
- Teotia, H. S.; Santos, J. R.; Ulbricht, K.A. Multitemporal effects in regional planning over a part of semi-arid region of Paraíba, Brazil. In: International symposium GIS - Between visions and applications, 5., Stuttgart, 1998. **Proceedings...** Stuttgart: Multimedia, 1998. 1 CD-ROM.
- Thome, K.; Markhan, B.; Barker, J.; Slater, P.; Biggar, S. Radiometric calibration of Landsat. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.63, n.7, p.853-858, Jul 1997.

- Tripathy, G.K.; Ghosh, K., Monitoring of desertification process in Karnataka state of India using multi-temporal remote sensing and ancillary information using GIS. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.12, p.2243-2257, Aug 1996.
- Trodd, N.M, Dougill A.J. Monitoring vegetation dynamics in semi-arid African rangelands - Use and limitations of Earth observation data to characterize vegetation structure. **Applied Geography**, v.18, n.4, p.315-330, Nov 1998.
- Tueller, P. T. Remote sensing science application in arid environment. **Remote Sensing and Environment**, v.23, n.2, p.143-154, May 1987.
- Tuecker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.8, n.2, p. 127-150, Aug 1979.
- Ulbricht, K.A.; Heckendorff, W.D. Satellite images for recognition of landscapes and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.53, n.4, p.235-243, Apr 1998.
- United Nations Environment Programme (UNEP). **World Atlas of Desertification**. London: Arnold Pub., 1992. 69p.
- United States Geological Service (USGS). **Landsat thematic mapper data**. Disponível em: <http://www.edc.usgs.gov/glis/hyper/guide/landsat_tm> Acesso em : 19 mai 2001.
- Valério Filho, M.; Pinto, S. A. F. **Análise e interpretação de dados de sensoriamento remoto**: texto de apoio para as aulas do Curso do mestrado em sensoriamento remoto. São José dos Campos: INPE, 1996. 42p.
- Vasconcelos Sobrinho, J. **O Grave problema ecológico da desertificação**. In: Estudos Nordestinos de Meio Ambiente. Recife: Massangana, 1986. 264p.

Walter, H. **Vegetação e zonas climáticas**: tratado de ecologia global. São Paulo: EPU, 1986. 325p.

Wamicha, W. N. Soil erosion hazards in Kieni division, Kenya In: International Conference on Geo-information for Sustainable Land Management, Enschede, 1997. **Proceedings...** Stocolm: Multimidia, 1997. 1 CD ROM.

Watrin, O. S.; Venturieri, A.; Sampaio, S. M. Análise multitemporal do uso da terra e suas interrelações com a cobertura vegetal em comunidades rurais do nordeste paraense. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, 1998. **Anais...** São José dos Campos: Multimidia, 1998. 1 CD ROM.

Woodcock, C.E. The Factor of Scale in Remote Sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.21, n.2, p.311-332, Mar 1987.

Wong, R.K.; Fung, T.; Leung, K.S.; Leung, Y. The compression of sequence of satellite images based on change detection. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.11, p.2427-2436, July 1997.

Zonneveld, I.S. Environmental indication. In: Lieth, H.(ed.) **Handbook of vegetation science**. vegetation mapping. Stocolm: Kluwer Academic Publishers, 1988. cap.36, p.491-498.

Zonneveld, I.S. Landscape survey and evaluation. **Journal of Arid Environment**, v.17, n.2, p.255-264, Sept 1989.

APÊNDICE A

LISTA DE NOMES VULGARES E CIENTÍFICOS DAS ESPÉCIES ENCONTRADAS NA CAATINGA DE QUIXABA

Nome vulgar	Nome científico
<i>Alecrim</i>	Lippia sp.
<i>Angico</i>	Piptadenia zenhieri
<i>Angico bravo</i>	Anadenanthera macrocarpa
<i>Angico de bezerro</i>	Piptadenia obliqua
<i>Aroeira</i>	Astronium urundeuva
<i>Baraúna</i>	Schinopsis brasiliensis
<i>Barriguda</i>	Chorizia ventriosa
<i>Bom-nome ou Pão de colher</i>	Maytenus rigida
<i>Brinco de sagüi</i>	Pithecellobium diversifolium
<i>Burra leitera</i>	Euphorbia hyssopifolia
<i>Canafistula</i>	Cássia excelsa
<i>Capim buffel</i>	Cenchrus ciliaris
<i>Capim massaroca</i>	Aristida elliptica
<i>Capim panasco</i>	Aristida setifolia
<i>Caroá</i>	Neoglaziovia variegata
<i>Carqueja</i>	Calliandra depauperata
<i>Cascudo</i>	Tabebuia spongiosa
<i>Catanduva</i>	Piptadenia obliqua
<i>Catingueira de porco</i>	Caesalpinia pyramidalis
<i>Catingueira rasteira</i>	Caesalpinia microphyla
<i>Catingueira verdadeira</i>	Caesalpinia pyramidalis
<i>Coroa de frade</i>	Melacactus bahiensis
<i>Caraibeira</i>	Tabebuia caraiba
<i>Facheiro</i>	Cereus squamosus
<i>Facheiro</i>	Pilosocereus glaucescens

(continua)

APÊNDICE A – Continuação.

<i>Favela de cachorro ou Favaleira</i>	<i>Cnidoscolus phyllacanthus</i>
<i>Favela de galinha</i>	<i>Cnidoscolus bahianus</i>
<i>Favela de tingui</i>	<i>Mascagnia cartácea</i> Loefg.
<i>Freijo, Freijorge</i>	<i>Cordia trichotoma</i>
<i>Imbiraçu</i>	<i>Pseudobombax simplicifolia</i>
<i>Imburana , Imburana de cambão</i>	<i>Bursera leptophloeos</i>
<i>Imburana de cheiro</i>	<i>Amburana cearensis</i>
<i>Imbuzeiro</i>	<i>Spodias tuberosa</i>
<i>Jatobá</i>	<i>Hymenaea courbaril</i>
<i>Jericó</i>	<i>Selaginella convoluta</i>
<i>Juazeiro</i>	<i>Zizyphus jazeiro</i>
<i>Jurema</i>	<i>Mimosa</i> sp.
<i>Jurema branca</i>	<i>Pithecellobium viridiflorum</i>
<i>Jurema preta</i>	<i>Mimosa hostilis</i>
<i>Jurema vermelha</i>	<i>Mimosa arenosa</i>
<i>Macambira</i>	<i>Bromelia laciniosa</i>
<i>Macambira de flecha</i>	<i>Encholirium spectabile</i>
<i>Malva branca</i>	<i>Herissantia crispa</i>
<i>Malva lava-prato</i>	<i>Herissantia crispa</i>
<i>Mandacaru</i>	<i>Cereus jamacaru</i>
<i>Maniçoba, Maniçoba brava</i>	<i>Manihot pseudoglaziovii</i>
<i>Marmeleiro</i>	<i>Croton hemiargyreus</i>
<i>Marmeleiro preto</i>	<i>Croton sonderianus</i>
<i>Moleque duro</i>	<i>Cordia leucocephala</i>
<i>Mororó</i>	<i>Bauhinia cheilantha</i>
<i>Palma forrageira</i>	<i>Opuntia ficus indica inermis</i>
<i>Para-raio (adventicia)</i>	<i>Nicotiana glauca</i>
<i>Pau branco</i>	<i>Fraunhoferia multiflora</i>
<i>Pau d'arco roxo</i>	<i>Tabebuia impetiginosa</i>

(continua)

APÊNDICE A - Conclusão.

<i>Pau ferro</i>	Caesalpinia ferrea
<i>Pau piranha</i>	Pisonia tomentosa
<i>Pau violeta</i>	Dalbergia cearensis
<i>Pereiro</i>	Aspidosperma pyrifolium
<i>Pinhão</i>	Jatropha mollissima
<i>Pinhão bravo</i>	Jatropha pohliana
<i>Pinhão de areia</i>	Jatropha mutabilis
<i>Quebra-faca</i>	Croton sp.
<i>Quebra-faca</i>	Acácia rhamnifolius
<i>Quipá</i>	Opuntia inamoema
<i>Quixabeira</i>	Bumelia sartorum
<i>Rama de boi</i>	Acácia piauhyensis
<i>Sete-cascas</i>	Tabebuia spongiosa
<i>Umbuzeiro</i>	Spondias tuberosa
<i>Xique-xique</i>	Pilosocereus gounelli, P. setosus

APÊNDICE B

LISTA DE NOMES VULGARES E CIENTÍFICOS DAS ESPECIES ENCONTRADAS NO CHACO ARIDO DE VALLE FÉRTIL

Nome científico	Nome vulgar
Acacia aroma	Aromito
Acacia caven	Tusca
Acacia furcatispina	Garabato
Aristida adscencionis	Seitilla
Aristida mendocina	Pasto rulo
Aspidospema quebracho-blanco	Quebracho blanco
Atamisquea emarginata	Olivillo
Bidens pilosa	Pata de gallina
Bouteloua aristidioides	Seitilla
Bulnesia retama	Retamo
Caesalpinia mimosifolia	Lagaña de perro
Trichocereus stelsnerii	Cardón
Cassia aphylla	Pichana
Celtis tala	Tala
Cenchrus myosuroides	Pincho
Cenchrus pauciflorus	Abrojo
Cercidium praecox	Brea
Chloris virgata	Pasto miel
Cordobia argentea	enredadera
Croton bomplandianum	tomatito
Geoffrea decorticans	Chañar
Gomphrena martiana	Pasto de gallina (Amaranthaceae)
Gouinia paraguariensis	Pasto bola
Jodinia rombifolia	Sombra de toro

(continua)

APÊNDICE B - Conclusão.

Larrea cuneifolia	Jarilla
Larrea divaricata	Jarilla blanca
Lippia turbinata	Poleo
Lycium chilensis	Palo amarillo
Mimoziganthus carinatus	Lata
Nicotiana glauca	Meada de perro
Opuntia sulphurea	Quisco
Prosopanche americana	Flor de piedra
Prosopis chilensis	Algarrobo negro
Prosopis flexuosa	Algarrobo Dulce
Prosopis torcuata	Matorro
Setaria leiantha	Cola de zorro
Trichomaria usillo	Matorro azul
Tricloris crinita	Pasto blanco
Tricloris pluriflora	Pasto blanco
Ximenia americana	Pata
Zuccagnia punctata	Jarilla macho (Favaea)
Zyziphus mistol	Mistol

APÊNDICE C

PUBLICAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA LONGITUDE DO TRANSECTO

DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE TRANSECTA PARA RELEVAMIENTO FISONOMICO-ESTRUCTURAL DE LA VEGETACIÓN DEL SEMIÁRIDO PARA SUMINISTRAR DATOS A LAS TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA ORBITAL

Francisco Darío Maldonado ¹; Vitor Celso de Carvalho ²; Clerio Lemos de Sousa ²;
Mariana Martinelli ¹; Osman José Pinheiro Junior ²; Filipe Vieira Fernandes dos Santos
².

¹ Centro de Fotogrametría y Cartografía, Universidad Nacional de San Juan-UNSJ, Argentina.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia-MCT/INPE-Brasil.

RESUMEN

La determinación del tamaño de la transecta es de gran importancia en los proyectos donde se utilizan imágenes, porque generalmente las áreas cubiertas son amplias y el costo del trabajo de campo debe estar equilibrado con el costo total del proyecto. En el presente trabajo fue determinado el tamaño óptimo de transecta para supervisar técnicas de percepción remota. Para esto, fue considerada la compleja relación de la vegetación del semiárido con la reflectancia y resolución espacial de las imágenes orbitales TM/Landsat. Se utilizó la información de seis campañas de campo en una amplia región del Nordeste brasileño. Luego de haber determinado que tipo de cobertura vegetal explica mejor los valores de reflectancia de las imágenes, fue determinada la longitud óptima de la transecta del relevamiento de campo, que permite obtener información confiable, para supervisar las técnicas de Percepción remota satelital. En una primera fase fue determinada estadísticamente que la cobertura vegetal total y arborea, explican mejor los valores de reflectancia en las imágenes del visible. Aunque las correlaciones no son altas, en el rango visible, son consistentes para la “Detección de cambios”.

Luego fue determinado que 45m sería la longitud mínima de transecta, a través de los "Graficos de Pearson-Hartley de Función de potencia del Test F". Este tamaño permitiría obtener información relevante de la vegetación de caatingas abiertas (estepas arbustivas) hasta caatingas arboreas (bosque seco). Basado en esto y en el tamaño del píxel de las imágenes, finalmente fue recomendado el muestreo con transectas de 50m con orientación Norte-Sur. Este tamaño y orientación permitirá obtener información del terreno con 80% de probabilidad de representar el valor de un píxel TM/Landsat.

CITA

Maldonado, F.D.; Carvalho, V.C.; Sousa, C.L.; Martinelli, M; Pinheiro, O.L.; Vieira, F. Determinación de la longitud de Transecta para relevamiento Fisonómico-estructural de la vegetación del semiárido para suministrar datos a las Técnicas de Percepción Remota orbital. **Multequina 13. Latin American Journal of Natural Resources**. Argentina: IADIZA /CONICET, 2004.

SUMMARY

The determination of transect size is of great importance in the projects where Remote Sensing techniques are used. In these the covered areas are generally ample and the cost of the fieldwork must be balance with the total cost of the project. In the present work the optimal transect size for supervise remote sensing techniques is determined. For that was considering the complex relation between the vegetation of semi-arid with reflectance and space resolution of TM/Landsat images. The information of six campaigns of fieldwork in a large region of the Brazilian Northeast was used. After to have determined that type of vegetal cover explains better the values of reflectance of the images, was determined the optimal transect size of the fieldwork. That allows to obtain reliable data for supervise Remote Sensing techniques. In first stage, the total and arboreal vegetal cover explains better the values of reflectance in the visible spectral images. Although the correlations are not high, are consistent for Change Detection in the visible range. Soon it was determined through the " Pearson-Hartley graphics of

Power of F Test", that 45m would be the minimum length of transect. This size would allow obtaining excellent data of the vegetation of "Caatingas abertas" (arbustive steppes) until "Caatingas arboreas" (dry forest). Based on this and the size of pixels of the images, the sampling with transects of 50m with North-South direction was recommended. This size and direction will allow obtaining data of the land with 80% of probability of representing a TM/Landsat pixel value.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se propuso determinar la longitud optima de transecta utilizada en relevamiento de campo, para supervisar las Técnicas de Detección de Cambios con Percepción Remota Orbital. Para esto, primero fue necesario determinar la capacidad de la transecta para explicar el comportamiento radiométrico de la vegetación en las imágenes orbitales TM / Landsat.

Numerosos estudios han demostrado la utilidad de las imágenes TM / Landsat para el análisis y el monitoreo de la cobertura vegetal de las tierras del semiárido. Este sistema de instrumentos orbitales esta en funcionamiento desde 1984 y tiene garantizada su continuidad por el programa LATI (Landsat Advanced Technology Instrument), que en el futuro mantendrá sus definiciones espectrales y su resolución espacial proporcionando una larga serie de datos consistentes y económicos como estiman Bied-Charreton y Cazaux (1989) y Campbell (1996). Muchos autores actualmente muestran opiniones favorables al uso de Landsat TM para el monitoreo ambiental y para el estudio de los procesos de desertificación, entre ellos puede mencionarse a Mulders y Epema (1986), Zonneveld (1989), Barrett y Curtis (1992), Choudhury (1992), Changyao, (1993), Pickup y Chewings (1996), Chen y Elvidge (1998) y Carvalho et al. (2001) entre otros.

La complejidad espectral de la vegetación de los ambientes semiáridos ha limitado la aplicación de datos de las imágenes. Esta dificultad se debe, en parte, a que los índices espectrales de vegetación están basados en valores de reflectancia del infrarrojo, los que no son confiables en ambiente árido, debido a que están relacionados con la existencia, forma y estructura de las hojas, como presenta Colwel, (1974). Otra dificultad es la alta

reflectividad de la superficie del suelo que disminuye la sensibilidad de los instrumentos a la vegetación en áreas de cobertura vegetal menores al 30%, como determinaram Chavez e McKinon, (1994) y Brussone y Serpico (1997).

En ese sentido, el esfuerzo actual de la investigación está orientado al desarrollo de técnicas de percepción remota capaces minimizar la heterogeneidad del comportamiento espectral de la vegetación, con fines de clasificación y detección de cambios. Asner et al. (2000) muestra que en el ambiente árido la variabilidad del comportamiento radiométrico del paisaje en la faja del visible puede atribuirse en 87% a la cobertura arbustiva y el 12% a la superficie del suelo. Según este autor gran parte del esfuerzo del relevamiento debe ser orientado para obtener datos de la cobertura arbustiva para conseguir resultados satisfactorios del análisis de los datos espectrales. Esta es la dirección es en la que se orienta este trabajo, buscando una técnica de relevamiento de campo que permita caracterizar fisonómico-estructuralmente a la vegetación. Considerando la estructura vertical (estratificación), estructura horizontal (cobertura) de la vegetación, y la superficie del suelo para la correlación con el comportamiento radiométrico en el rango visible. El diseño del relevamiento debe optimizarse para muestrear con buena relación costo-beneficio las amplias áreas abarcadas por los proyectos que usan imágenes orbitales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es el Bioma de la caatinga, que ocupa el semiárido de la mayor parte del Nordeste de Brasil. Según Velozzo et al. (2001) este bioma es el más amenazado de los biomas brasileños debido a los centenares de años de uso inadecuado e no sustentable de los suelos y de recursos naturales.

En la Figura 1, se resaltan las seis unidades muestreadas. Estas se limitan a regiones donde domina la vegetación de la caatinga (formación arbustiva arbórea caducifolia espinosa o sabana estépica, de acuerdo con IBGE, 1997). Se trata de un complejo vegetacional caracterizado por la presencia dominante de especies leñosas espinosas, de follaje en generalmente caducifolio y hojas pequeñas, con elementos arbóreos raramente mayores a los 14 metros y arbustivos con alturas que pueden alcanzar los 4 metros, con biomasa variables desde el tipo estépico: Caatinga arbustiva (Estepa arbustiva) hasta Bosque

Seco (Bosque estacional decíduo). Siempre con presencia marcada de cactáceas y bromeliáceas de porte herbáceo a arbóreo. Cabrera e Willink (1973) incluyeron la Caatinga en el dominio chaqueño e Schultz (1995) las llamó de estepas florestadas.

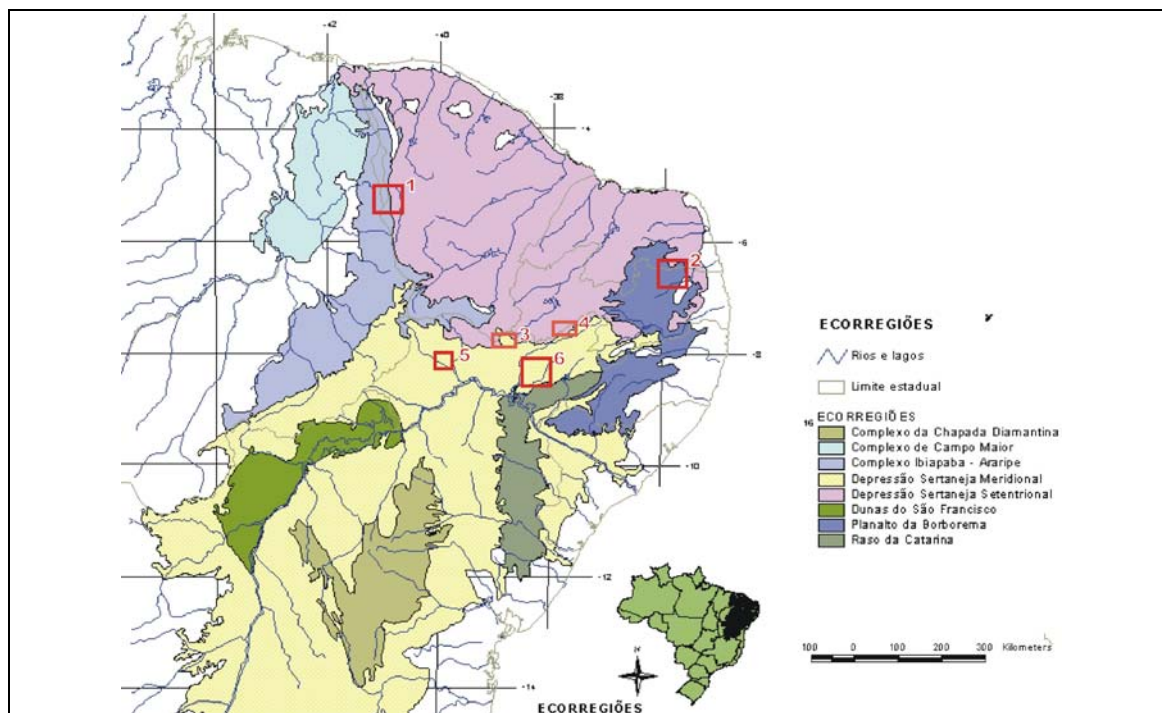


Fig. 1 – Localización de las unidades de relevamiento en el bioma de la caatinga. 1) Serra das Almas, 2) Curimatá, 3) Cedro, 4) Soledad, 5) Quixaba y 6) Betânia.

3. MATERIALES

Se realizaron 90 transectas de 50 metros de longitud cada una, localizados con GPS Garmin 12XL con antena externa. El tratamiento de los datos del campo se realizó con el software Trackmaker 11.8 (Ferreira,2003). Las medidas radiométricas se realizaron en ambiente Spring 6.2 (INPE, 2003) y ERDAS Imagine 8.4, usando seis imágenes Landsat ETM+ en formato digital.

4. MÉTODO

A continuación en la Figura 2, se presenta el Fluxograma general de la investigación.

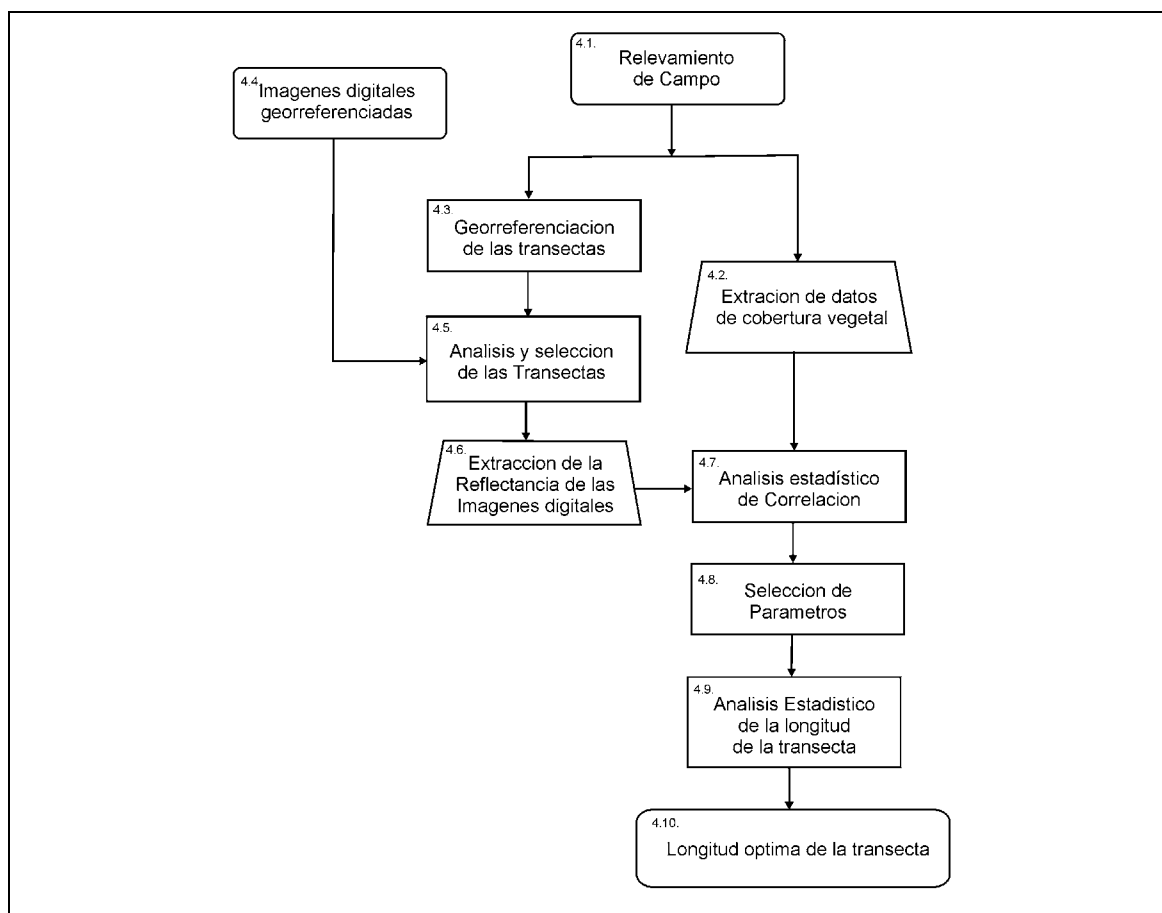


Fig. 2 – Fluxograma general de la investigación.

4.1. Relevamiento de campo

Para distribuir las muestras en las área se utilizó un diseño de muestreo no aleatorio selectivo. Esta técnica es la más apropiada cuando el relevamiento debe ser realizado optimizando la relación costo/beneficio, según Cochran (1977). Así, la distribución de las muestras obedece al principio de estratificación sujeta al criterio de proporcionalidad, basado en la delimitación de áreas de interés en las imágenes, como es aconsejado en IBGE (1992). El relevamiento de campo no esta orientado al mapeo de comunidades por esta razón no se exige rigor en la identificación y conteo de todas las especies, solamente cuando son indicadoras de cambios o de la dinámica del sitio. Por tanto, no es necesario un análisis fitosociológico, siendo suficiente la caracterización de la fisonomía, estructura horizontal y vertical de la vegetación, y las condiciones de la

superficie del suelo, como señala K uchler (1988), Zonneveld (1988) y Moore & Chapman (1990). IBGE (1992) recomienda para el mapeo de la vegetaci3n de la caatinga el tamaño normal de muestreo 0,02 hect areas y la técnica de transecta en línea para la caracterizaci3n combinada de la din mica y de la fisonomía de la vegetaci3n. En su trabajo, Carvalho (1986) us3 con éxito para la caracterizaci3n fison3mico-estructural de la vegetaci3n de la área de Quixabá, un transecta en faja de 40x6m. Maldonado (1999) en esta misma área utiliz3 una transecta lineal de 40 metros, la que consider3 apropiada para el Análisis de detecci3n de cambios con Percepci3n remota.

En este trabajo, se ha utilizado un tamaño de transecta en línea de 50m de longitud, con la orientaci3n norte - sur. Este tamaño sobredimensionado permite utilizar los datos del muestreo como control en el tratamiento estadístico de determinaci3n de la longitud 3ptima de transecta, así como asegura que la muestra representa, con 80% de probabilidad, un píxel TM de 30x30m, permitiendo así relacionar del comportamiento radiométrico del píxel con la muestra de campo. Esta línea se materializa en el terreno con una cinta de 50m, dispuesta en direcci3n norte-sur y son realizadas metro a metro las anotaciones de las ocurrencias de especie, forma del individuo, estrato, altura y condici3n de la superficie del suelo. Este procedimiento está ilustrado en la Figura 3 y ya fue utilizado con buen rendimiento en Maldonado (2002).

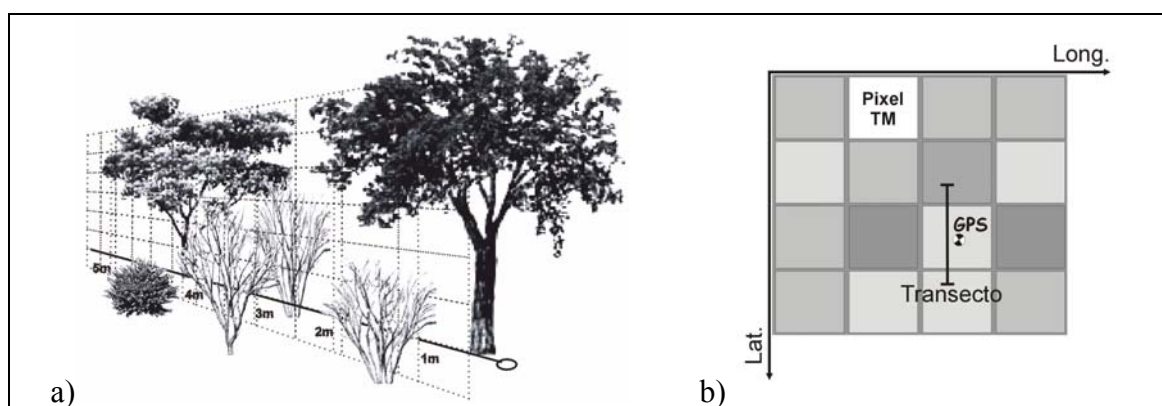


Fig. 3 Representaci3n del muestreo y de la probable localizaci3n de la transecta de 50 metros sobre los píxeles de una imagen Landsat

4.2. Extracción de los datos de cobertura vegetal.

La cobertura vegetal es analizada de manera simple, a través de la proporción de presencia de cada estrato sobre la totalidad de la cinta. De la misma forma se realizan los cálculos para obtener los porcentajes de suelo desnudo. La cobertura total se calcula como la suma simple de las coberturas arbórea, arbustiva y herbácea. Este valor de cobertura total posee significado volumétrico y permite interpretar las imágenes satelitarias a través de la comprensión de la interacción de la vegetación con la radiación solar, sombreado, etc.

4.3. Georreferenciación de las muestras.

El posicionamiento preciso de los sitios muestreados es importante cuando los datos de campo se usan combinados a los datos de radiometría de las imágenes. Para este trabajo, el punto central de la transecta se localizó con GPS (FIGURA 3b). El uso de antena externa y el entorno despejado permitió un error promedio de 10 metros para la estimación de la posición de las muestras en el terreno. Este error de posición combinado al error de registro de las imágenes, aumenta la incertidumbre de la correspondencia pixel/transecta. De acuerdo con Bernstein (1983) y Dai y Khorram (1998), esta confiabilidad disminuye a medida que aumenta la heterogeneidad de la reflectancia de los píxeles en la región de la imagen donde se localiza la muestra.

4.4. Imágenes digitales georreferenciadas.

Estas imágenes se forman con la banda espectral TM3, situada en el espectro óptico correspondientes a la faja del rojo entre 0,6 y 0,7 μm . Las imágenes están formadas por una matriz de píxeles, siendo éstos las unidades menores de la imagen. Cada pixel, representa una unidad discreta de área en el terreno, de la cual el flujo radiante es integrado por un detector. Esta matriz de píxeles es georreferenciada sin modificar los valores de la reflectancia utilizando la técnica de remuestreo del vecino más próximo, lo que hace posible establecer una correspondencia entre los datos obtenidos en el relevamiento de campo y los de reflectancia de las imágenes georreferenciadas.

4.5. Análisis y selección de transectas

Este análisis es basado en la incertidumbre de la posición de las muestras sobre los píxeles de la imagen y en la heterogeneidad de la radiancia de los píxeles vecinos a estas. Las muestras fueron categorizadas en más o menos confiables, en cuanto a su relación datos de campo / radiometría. Cuanto mayor la heterogeneidad entre píxeles, menor la confiabilidad para correlacionar los datos de reflectancia y los del relevamiento de campo. Así, las muestras con baja confiabilidad fueron descartadas.

4.6. Extracción de la reflectancia en las imágenes digitales

Para realizar un estudio cuantitativo entre imágenes, fue necesario transformar los números digitales en valores de reflectancia según Chavez (1989) y Chavez (1996). El trabajo con los valores del visible corregidos es la única forma de obtener buenos resultados en el estudio de la vegetación de los ambientes semiáridos, según Bowker y Davis (1992), Bruzzone y Serpico (1997), Trodd y Dougill (1998) y Asner et al (1998 y 2000).

4.7. Análisis estadístico de correlación

Los datos de la cobertura vegetal obtenidos de las transectas fueron correlacionados con la reflectancia del punto muestral de la imagen, procurando la mejor combinación cobertura/reflectancia que explique el comportamiento radiométrico de las imágenes.

4.8. Selección de los parámetros

Se seleccionaron los parámetros que mejor explican el comportamiento de la reflectancia. Aquellos que presentaron los mayores coeficientes de correlación con los valores de reflectancia. Las correlaciones más positivas o negativas son las que expresan una relación causal mayor con la reflectancia del sitio muestreado. A priori, se espera que la cobertura vegetal presente correlación negativa con la reflectancia y que el suelo expuesto presente valores positivos.

4.9. Análisis estadístico de la longitud de la transecta

Este análisis está dividido en dos partes, una primera exploratoria basada en la simple observación de los cambios del CV (coeficiente de variación) de cada cobertura, frente a los cambios en la longitud de la cinta usada para el muestreo. Este coeficiente CV es una estandarización de la varianza que permite comparar las estimaciones de variabilidad sin tener en cuenta la magnitud, en este caso los porcentajes de cada tipo de cobertura. Para este análisis, la totalidad de las muestras se analizan metro a metro, suponiendo que en sucesivas campañas de muestreo la longitud de la transecta fue aumentada, desde una primera con transectas de 1m, hasta la última campaña con transectas de 50m. La estabilización de este coeficiente indica que la media y varianza muestral se han estabilizado y que han sido obtenidos parámetros muestrales que pueden estimar satisfactoriamente a los poblacionales, según Eberhardt (1990) y Reed et al. (2002).

En una segunda parte del análisis, la longitud de la transecta es analizada como un conjunto de muestras puntuales a cada metro. Y para cada una de las seis áreas fue tomada solamente una transecta. En este test se desea comparar cada área, siendo la hipótesis nula (H_0) que todas las áreas son iguales y la alternativa (H_1) que por lo menos una es diferente. Para este test los parámetros iniciales fueron obtenidos de la totalidad del muestreo. O principal parámetro calculado, Φ es una medida de “No centralidad” dependiente del error cuadrático de todas las muestras de referencia, y del número de áreas a ser comparadas por la hipótesis. También, deben ser definidas las probabilidades deseadas para controlar los Errores de inclusión (Tipo I) y exclusión (Tipo II). De este modo fue extraído el tamaño mínimo de la muestra del gráfico “Pearson-Hartley de potencia del test F”, graficados en Feldt y Mahmoud (1958) citados por Netter et al. (1996).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. La variabilidad de la Caatinga por cobertura por estrato y por grado de suelo expuesto

Se puede generalizar que la vegetación muestreada con transectas se caracteriza por tener una cobertura arbórea variable de 0 a 100%, con media en torno a 40%, variando generalmente entre 30 a 80%; un estrato arbustivo siempre presente y siempre mayor del 30% y en media en torno al 60%, variando ampliamente entre 30 a 85%; la cobertura herbácea frecuentemente faltante con valores medios en torno de 55%, mas concentrada de 40 a 80%; y la proporción de suelo expuesto en general variando de 0 a 20% y con 40% como máximo. Sumando estos valores se puede decir que la cobertura total fue siempre superior al 90%, teniendo como máximo 250% y concentrándose en general entre 120 a 180%.

5.2. Influencia de la cobertura sobre la reflectancia

A seguir, se presenta en la Figura 7 la dispersión de los valores de reflectancia del pixel relativo a la cobertura de los diferentes estratos vegetales. Como se puede observar la dispersión de los valores es muy grande

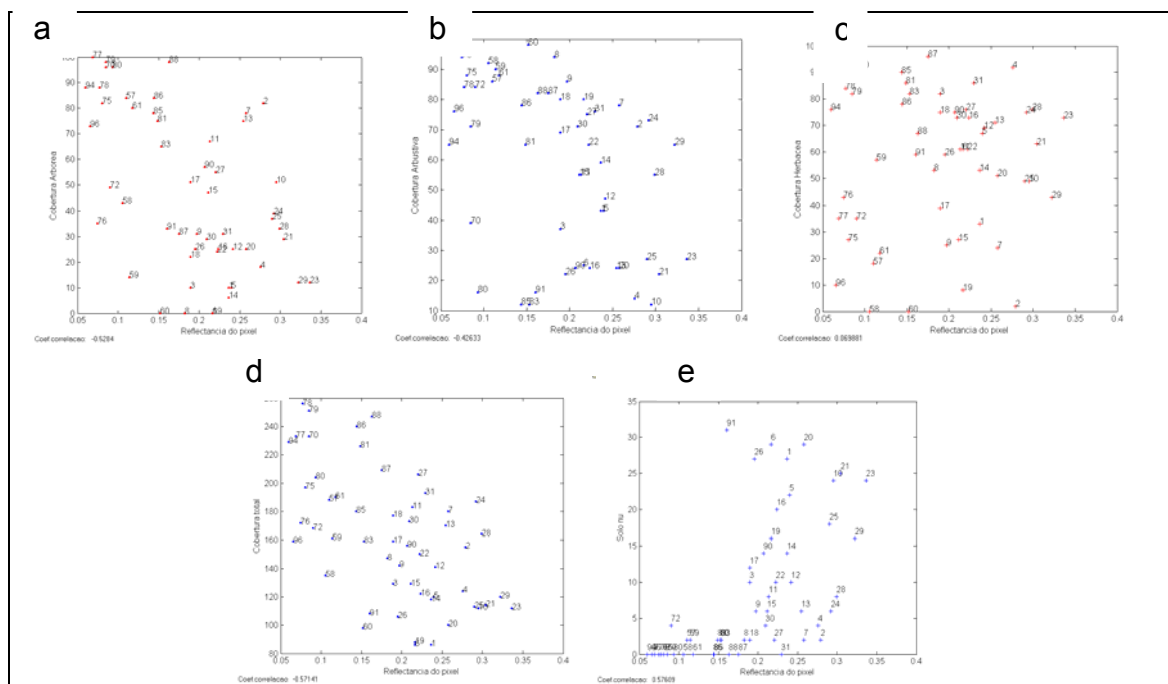


Fig. 7 - Dispersogramas cobertura vegetal sobre reflectancia de la imagen. En a) cobertura arbórea; b) cobertura arbustiva; c) cobertura herbácea; d) cobertura total y e) suelo desnudo.

Resumiendo los resultados de este análisis en la Tabla 2, se observa mas fácilmente que los coeficientes de correlación entre la reflectancia de las clases de coberturas fueron bajos, considerando que las imágenes fueron obtenidas en la época seca, donde se esperaba mayor correlación. El signo negativo de la correlación indica que la reflectancia aumenta con la disminución de la cobertura, como se observa con la cobertura total, arbórea y arbustiva.

Tabla 2 - Datos estadísticos de cobertura, media, desvío estándar y correlación con valores de reflectancia.

Tipo de cobertura	Media [%]	Desvío estándar [%]	Coefficiente de Correlación	Error cuadrático medio
Cobertura Arbórea	46.41	31.52	-0.528	193.13
Cobertura Arbustiva	58.11	27.83	-0.426	183.24
Cobertura Herbácea	56.69	26.82	0.069	194.88
Cobertura Total	161.20	159.10	-0.571	277.06
Solo expuesto	8.33	9.75	0.576	58.05

La clase “suelo expuesto” explica 57,6% mostrando la importancia relativa de su contribución en el comportamiento espectral de la caatinga. La importancia del suelo desnudo sobre el comportamiento radiométrico del visible, puede ser explicada por la alta reflectancia de la superficie del suelo, seco y pobre en materia orgánica como apuntan Baumgardner et al. (1970) e Pinker e Karnieli (1995). En términos absolutos todos los valores de correlación observados son bajos, lo que ya fue observado por Asner (2000). Las clases Cobertura total (-57.1%), Cobertura arbórea (-52.8%) y Cobertura arbustiva (-42.6%) explican débilmente los valores de reflectancia. Se esperaba que el peso del estrato arbustivo se manifestara de manera mas evidente, considerando que en los relevamientos de campo se observó que este es el que produce las mayores modificaciones ambientales. Este estrato es muy productivo y además de su propia biomasa produce abundante mantillo (materia seca que cubre la superficie del

suelo). La contribución del estrato herbáceo en la caatinga es insignificante y no correlacionado. Estos resultados confirman, de una manera general, el comportamiento esperado de la caatinga en términos de comportamiento espectral, incluso en términos de jerarquía de importancia de los estratos, en función de su mayor o menor influencia sobre la reflectancia registrada en la imagen satelitaria.

5.3. Análisis de la longitud de la transecta

Establecidos los parámetros de campo más importantes, fue determinada la longitud óptima aproximada de la transecta. Para esto fueron analizadas las curvas de coeficientes de la variación (CV) de las cuatro clases de cobertura vegetal, en función de la longitud de la transecta (FIGURA 8). Se observa fácilmente que el CV aumenta rápidamente y pronto se estabiliza. Esto sucede por la estabilización de la media y la variancia e indica que se ha conseguido relevar la variabilidad de la cobertura vegetal estudiada.

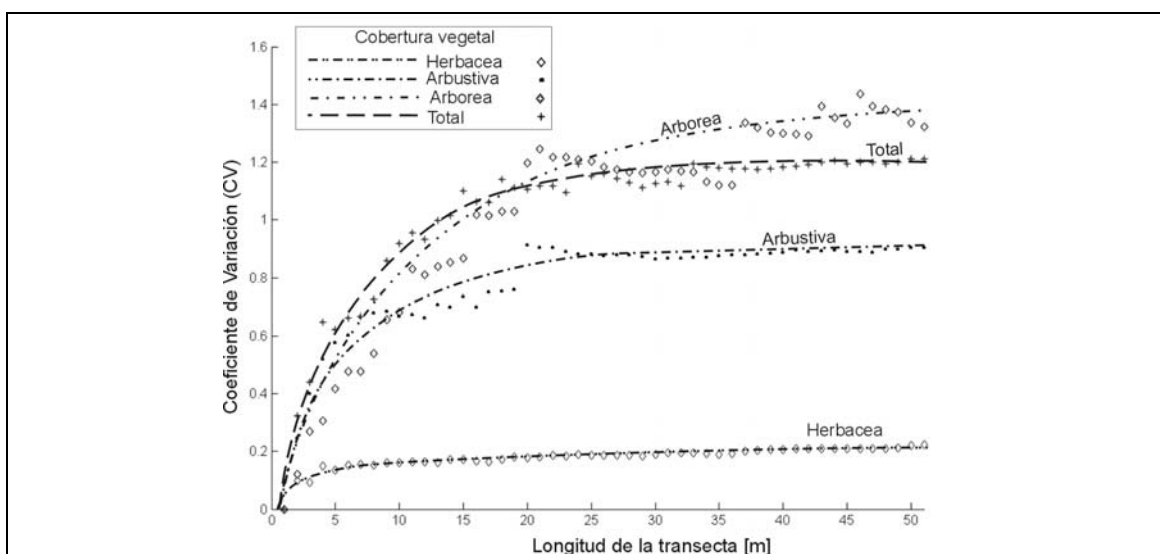


Fig. 8 - Estudio del o Coeficiente de variación (CV), en a) CV de la cobertura arbórea, en b) CV de la cobertura arbustiva, c) CV de la cobertura herbácea, e d) o CV de la cobertura total.

El comportamiento observado está dentro de lo esperado, la curva del estrato herbáceo se estabiliza rápidamente; la curva del estrato arbustivo se estabiliza luego, alrededor de los 20 metros; la cobertura total, poco después, alrededor de los 25 metros y la cobertura

arbórea alrededor de los 50m presenta fuerte tendencia a la estabilización. Considerando que, la cobertura total es la que mejor explica el comportamiento radiométrico de la caatinga y que su CV se estabiliza alrededor de los 25 metros, puede admitirse que la longitud óptima, sea un poco mayor que esta medida. Aunque, teniendo en cuenta la experiencias anteriores en Carvalho (1986) y Maldonado (1999), una longitud de 40 metros puede ser mas apropiada para caracterizar la estructura de la vegetación en términos de relación costo/beneficio.

5.4. Determinación estadística de la longitud mínima de la transecta

La longitud obtenida usando los gráficos de "Pearson-Hartley" fué de 45m (o 45 muestras). Esta es la longitud mínima que permitiría obtener información fisonómico-estructural confiable de todas las áreas, desde Caatingas arbustivas hasta arbóreas.

Este cuidado para una determinar de la longitud mínima de la transecta es debido a que el aumento de la longitud de la transecta produce un aumento mayor en el tiempo necesario para el relevamiento, este aumento es agravado cuando la cobertura vegetal es alta. Por ejemplo, una transecta de 50 metros en área degradada consumió 15 minutos y en áreas de Bosque hasta 90 minutos.

La consideración final para definir la longitud óptima de transecta, esta relacionada con la resolución espacial de las imágenes satelitales usadas. En el caso del uso de resoluciones espaciales de 30x30m, como las de TM, la longitud de 50 m tiene una probabilidad de 80% de representar un sitio cuya reflectancia está integrada en un pixel, una longitud menor posee una probabilidad baja y una longitud mayor podría contener hasta dos píxeles, lo cual en las áreas degradadas representa una desventaja.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis de estos resultados puede concluirse que la longitud recomendada para la transecta es de 50m. Así, puede ser caracterizada la heterogeneidad de la vegetación y explicada la reflectancia del pixel de las imágenes TM/Landsat. Esta longitud puede reducirse al mínimo de 45m, cuando se usan imágenes de resolución espacial mayor, como ocurre actualmente con el uso de imágenes SPOT o ASTER (15m). También puede concluirse que la cobertura vegetal total es la que mejor explica la radiometría de

las imágenes del espectro visible, al menos en la época seca. Sin embargo, los valores de correlación bajos entre la cobertura y la reflectancia, indican la obligación de incluir en el análisis otros factores ambientales. La confiabilidad de la correspondencia campo/imagen podría ser mejorada aumentando la precisión de la posición del GPS, o aumentando la longitud de la transecta. Aunque, esto último posee serias desventajas; por ejemplo 60m permitiría contener con certeza un pixel completo TM/Landsat, pero también aumentaría el tiempo de medición.

AGRADECIMIENTOS

A la “Fundação de Amparo a la Pesquisa del Estado de São Paulo - FAPESP/Brasil” que financió la campaña de campo a través de un “Projeto Regular de Auxilio à Pesquisa”. El primer autor es becario de doctorado de la “Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior - CAPES/Brasil”.

REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

As citações do paper podem ser consultada na revisão bibliográfica da presente tese.

APÊNDICE D

DADOS DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS DO ANO 1984, DE MAIO ATÉ OUTUBRO

Postos Pluviométricos	Maio (mm)	Junho (mm)	Julho (mm)	Agosto (mm)	Setemb (mm)	Outubr (mm)
ICAICARA	17.5	6.1	10.6	0.0	5.6	58.4
PARNAMIRIM	5.5	0.0	9.7	0.0	0.0	15.0
POÇO DO FUMO	28.8	4.0	9.8	0.0	0.0	37.2
ESTACA	0.0	5.3	11.5	2.6	3.3	6.0
JACARÉ	29.4	3.2	11.9	2.8	7.3	0.0
MATIAS	26.0	0.0	5.3	0.0	5.5	3.1
CANTO DA PEDRA	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0

GLOSSÁRIO

Alqueive: Terra lavrada que se deixou em pousio. Estado de terra alqueivada.

Atravessamento: É o ato das gotas de chuva atravessarem a copa das árvores, durante um evento chuvoso. O atravessamento inclui as gotas de chuva que caem direto no solo, sem bater nas copas das árvores, e também as gotas que são interceptadas pelas folhas e depois gotejam no solo.

Bruno não cálcico: Classe de solo que compreende indivíduos pouco profundos e/ou rasos, com horizonte B textural (Bt) de coloração avermelhada viva, atividade de argila e saturação de base muito alta. O horizonte A é, em geral, fracamente desenvolvido e de estrutura maciça. Estas paisagens estão relacionadas quase que exclusivamente com a zona fisiográfica do Sertão Nordestino sob vegetação da Caatinga hiperxerofila árvore - arbustiva. Ocorre em topografias de superfície suave e fortemente ondulados com vales em “V” abertos e vertentes de dezenas de metros. Na superfície é comum a ocorrência de cascalhos e calhaus de quartzo formando um tipo de pavimento desértico.

Compacidade: Relação entre o volume realmente ocupado pelas partículas de um solo e o volume aparente deste, a qual varia conforme as dimensões dos poros existentes entre aquelas partículas.

Interação: Ação que se exerce *mutuamente* entre duas ou mais coisas.

Iteração: Processo de resolução (de uma equação, de um problema) mediante uma seqüência finita de operações em que o objeto de cada uma é o resultado da que a precede.

Litter: ver. Serrapilheira

Mulches: são práticas de cobrir a terra das culturas com camadas de capins, palha, resíduos ou qualquer material que pode apodrecer, de modo de cobrir todo o solo, para evitar a erosão e perda da umidade do solo segundo Duque (1980) e Gomes (1984).

Pousio: Repouso periódico de um ou mais anos, em que se deixam certas terras de semeadura para recuperarem a fertilidade. Terreno cuja cultura se interrompeu para esse repouso.

Reconquista vegetal: Termo para se referir à ocupação sucessional da vegetação natural das áreas modificadas ou desprovidas de cobertura vegetal e abandonadas.

Saprólito: Material intemperizado do qual procede a formação do solo.

Seixos pequenos ou pedregulho: Fragmentos de rochas transportados pelas águas, de 2 a 10 mm (Guerra e Cunha, 1996). Em alguns casos podem ser de origem local do saprólito.

Selagem: É o processo que dá origem à formação de crostas no solo. Ele ocorre em função da ruptura dos agregados que se depositam nos poros superficiais do topo do solo, fazendo diminuir a porosidade superficial. A selagem faz que haja aumento do índice de escoamento superficial (Guerra e Cunha, 1997). Este pode ser produto da exposição do solo ao impacto das gotas de chuva.

Serrapilheira: É a matéria orgânica decomposta, que ocorre no topo dos solos. Pode ser formada a partir de restos de folhas, sementes, frutos, galhos e restos de animais que vivem nas áreas florestais. Essa matéria orgânica decomposta, além de contribuir para maior fertilidade dos solos, também auxilia em diminuir o efeito do impacto das gotas de chuva, que ocorrem pelo atravessamento (Guerra e Cunha, 1996).

Tipos estruturais: Bases do sistema de classificação estrutural, formulado pela repetição ou distribuição no espaço horizontal e vertical dos indivíduos que formam a vegetação, segundo Carvalho (1986). Podem-se distinguir três componentes estruturais, a estrutura horizontal ou padrão, a estrutura vertical ou estratificação, e a estrutura quantitativa ou recobrimento do solo pela biomassa. Esta cobertura pode ser classificada em: Densa com cobertura superior ao 40%, Aberta com cobertura entre 10 e 40%, Esparsa com cobertura entre 2 e 10% e Ausente ou rara cuja cobertura é inferior a 2%.

ÍNDICE DE AUTORES

Accioly	36, 64, 246
Akibode	73, 246
Aligula	71, 73, 246
Almeida	71, 246
Aronoff	73, 246
Art	32, 246
Asner	26, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 123, 126, 247
Babayev	36, 109, 247
Banon	66, 247
Barker	50, 260, 266
Barrett	276
Baumgardner	27, 247, 266, 285
Bernstein	48, 59, 247
Bied-Charreton	247, 276
Biurru	23, 247
Bowker	56, 58, 248
Boyd	49, 248
Braun-Blanquet	23, 132, 135, 140, 248
Bruzzzone	68, 248
Burrows	133, 248
Byrne	68, 109, 248
Cabrera	20, 80, 248, 278
Campbell	25, 249, 276
Carrilho	68, 249
Carvalho	13, 36, 71, 72, 81, 94
CCRS	46, 249
Changyao	36, 249, 276
Chavez	36, 53, 54, 58, 65, 68, 169, 197, 249, 250, 264
Chen	276
Choudhury	30, 250

Chuvieco.....	58, 250
Cohen.....	36, 250
Conese	65, 250
Congalton	73, 74, 106, 178, 192, 193, 195, 196, 250, 251, 258, 259, 266
Coppin	62, 251
Cottam	132, 251
Cracknell.....	53, 251
Crosta.....	60, 64, 251
Dalmaso	83, 85, 251
Demaio	23, 252
Dregne	32, 34, 252
Drumond.....	33, 252
Duque	27, 85, 252
Dwivedi	34, 252
Eastman	64, 68, 110, 252
Egler	34, 252
Elmore	64, 253
Elvidge.....	50, 110, 253
ERDAS	94, 278
Escadafal.....	36, 37, 56, 253
Faria	23, 87, 253
Fuller.....	290
Fung.....	61, 64, 197, 253, 254, 268
Garcia	91, 254
Gausman	35, 254
Gillette	73, 254
Goeffrey.....	64, 254, 290
Goldsmith	75, 132, 254
Gomes.....	3, 100, 105, 254, 294
Green	60, 64, 73, 74, 178, 193, 195, 196, 251, 254
Guangwei.....	71, 73, 255

Guerra.....	24, 90, 255
Guyot.....	58, 64, 255
Hanan.....	73, 255
Hare.....	20, 21, 256
Hayes.....	53, 251
Hill.....	34, 49, 64, 252, 253, 256, 263
Hoffer.....	255
Huete.....	30, 256
Hutchinson.....	27, 256
IADIZA.....	78, 260, 261
IBGE.....	75, 78, 93, 124, 126, 256
Igbokwe.....	61, 256
Jensen.....	64, 257, 258
Jiaju.....	68, 107, 257
Joria.....	64, 257
Karlin.....	23, 257, 262
Karnieli.....	27, 58, 64, 257, 263
Kazmierczak.....	36, 257
Kelly.....	51, 257
Kiefer.....	47, 54, 258
Kiesling.....	257
Küchler.....	75, 258, 280, 291
Kumar.....	25, 35, 252, 258
Landsat 7.....	45, 92, 258
Lee.....	68, 258
Lillesand.....	47, 54, 258
Lillestrand.....	61, 258
Lima.....	84, 129, 252, 258
Lunetta.....	73, 253, 258, 259
MacKinnon.....	36, 68, 250, 289
Macleod.....	106, 259

Maldonado.....	31, 36, 37, 68, 71, 75, 97, 100, 106, 109, 126, 127, 132, 135, 141
Markham.....	50, 260
Marquez.....	81, 83, 84, 85, 93, 94, 251, 254, 261, 262
Martins.....	88
Mas	33, 48, 49
Mather.....	53, 54, 59, 261
Matteucci	126, 261
Milton	27, 35, 261
Minetti	21, 94, 219, 261
Moore	30, 135, 140, 254, 261
Morello	83, 262
Mulders.....	262, 276, 291
Negreiros Bessa.....	23, 262
Oliveira	88, 246, 289
Ortiz.....	81, 94, 246, 254, 261, 262
Pastran	84, 254, 261, 262
Paton.....	24, 90, 262
Perpiñal.....	84, 262
Perumal.....	71, 73, 263
Pickup.....	34, 37, 263, 276, 291
Pinker.....	27, 263, 285, 291
Pons	49, 263
Price.....	51, 263
Prince.....	27, 263, 290
Puigdefábregas	236, 264
Ray.....	32, 264
Richards.....	52, 53, 59, 65, 68, 103, 264
Rizzini.....	20, 264
Robinove.....	36, 48, 49, 64, 107, 264
Sá	36, 39, 40, 41, 42, 43, 72, 82, 128, 264
Sader.....	61, 264

Salinas.....	259
Sarmiento.....	22, 265
Schowengerdt	19, 45, 48, 265
Schultz.....	278
Shoshany.....	36, 265
Singh.....	62, 63, 64, 107, 197, 265
Sirtoli	68, 265
Slater.....	24, 265, 266
Sobrinho	17, 24, 33, 266, 267
Story	193, 266
Stow.....	73, 109, 266
Strassburger	20, 266
Teotia.....	71, 73, 266
Thome.....	266
Tripathy	36, 266
Trodd	71, 266
Tuecker.....	64, 267
Tueller.....	27, 267
Ulbricht.....	61, 266, 267
UNEP.....	17, 267
USGS.....	45, 267
Walter	22, 267
Wamicha.....	71, 73, 267
Watrin.....	71, 267
Wong	64, 268
Woodcock.....	34, 268
Zonneveld.....	35, 75, 126, 135, 258, 268, 276