



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5501-TDI/516

**IMAGENS DO SISTEMA SENSOR AVHRR/NOAA
NA DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESMATAMENTOS
NA FLORESTA AMAZÔNICA –
RELAÇÕES COM DADOS DO SISTEMA TM/LANDSAT**

Silvana Amaral

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. João Roberto dos Santos e Dr. Alberto Waingort Setzer, aprovada em novembro de 1992

528.711.7:502.2(811.3)

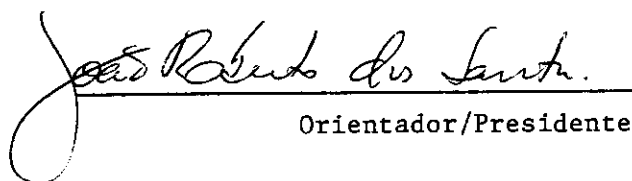
AMARAL, S.

Imagens do sistema sensor AVHRR/NOAA
na detecção e avaliação de desmatamentos
na Floresta Amazônica: relações com dados
do sistema TM/Landsat. / S. Amaral.--
São José dos Campos: INPE, 1992. 195p.--
(INPE-5501-TDI/516)

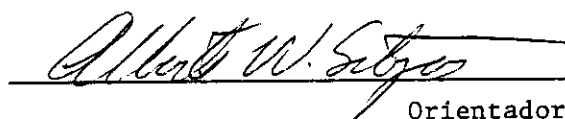
1. Desmatamento. 2. Resolução espacial.
3. Amazônia. 4. Título

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

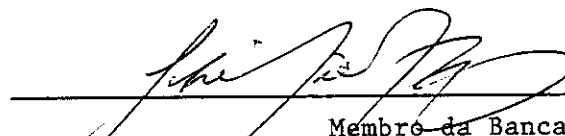
Dr. João Roberto dos Santos


Orientador/Presidente

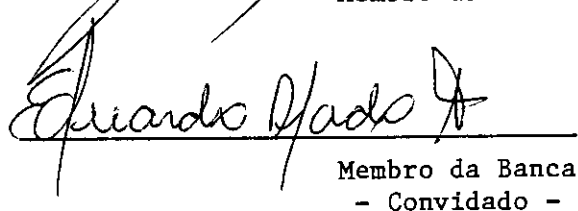
Dr. Alberto Waingort Setzer


Orientador

Dr. Getúlio Teixeira Batista


Membro da Banca

Dr. Eduardo Delgado Assad


Membro da Banca
- Convidado -

Candidata: Silvana Amaral

São José dos Campos, 17 de setembro de 1992

A Rubens e Jeanete, princípio de tudo, pelo
incentivo e dedicação de sempre.
A Beth, Adriana e Bá, porque a vida é breve,
bela e única.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico, pela bolsa de estudos, e à FAPESP, Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo crédito dado para complementação deste trabalho.

Ao Dr. João Roberto dos Santos pela orientação, revisão da interpretação visual de imagens, sugestões e apoio em todas as etapas do trabalho.

Ao Dr. Alberto W. Setzer pela orientação, dedicação, incentivo e amizade, que foram fundamentais para a realização deste.

A João A. de C. Paiva, Júlio C.L. D'Alge, Guaracy J. Erthal, Carlos Felgueiras e Fernando Ii, pelas sugestões na definição da metodologia e procedimentos do processamento de imagens e análise geográfica de dados, com os sistemas SITIM-150 e SGI.

A Vera G. da Silva, Valéria A. Pelodan e Maristela C.F.A. Silva pelo auxílio na digitalização e edição dos dados no SGI.

A Marcos R.R. Ramos pelo apoio no procedimento de leitura das imagens AVHRR no INPE - Cachoeira Paulista.

Ao pesquisador Marcos C. Pereira pelo incentivo e introdução aos sistemas de processamento digital de imagens AVHRR/NOAA.

RESUMO

Este trabalho avalia o uso de imagens AVHRR/NOAA para detecção e avaliação de desmatamento na Floresta Amazônica a partir de validação e calibração com imagens TM/Landsat. Desenvolveu-se uma metodologia piloto para a região da Serra do Roncador - MT, onde o desmatamento é proveniente da instalação de projetos agropecuários de grande escala. Utilizou-se uma imagem AVHRR de 2 km de resolução espacial, corrigida geometricamente, para a classificação de áreas desmatadas e de floresta. A identificação destas classes, assim como a comparação dos resultados de área estimada na interpretação visual de imagens TM/Landsat, baseou-se no uso de Sistema Geográfico de Informação. Os resultados AVHRR de área de floresta e desmatamento foram comparados aos dados TM em análises estatísticas, onde obteve-se forte correlação e regressão linear entre eles ($R^2 = 0,93$). A aplicação do modelo obtido na região de São José do Xingu, MT, de padrão de desmatamento semelhante a primeira área, mostrou-se apropriada com erros médios de 3% para área total de floresta. Os resultados obtidos permitiram indicar a banda 3 AVHRR para a detecção e monitoramento de alterações em áreas florestais. Dados TM/Landsat são necessários para calibração das estimativas de área.

AVHRR/NOAA IMAGES TO DETECT AND QUANTIFY DEFORESTATION IN
AMAZON FOREST - RELATIONS WITH TM/LANDSAT DATA

ABSTRACT

This work analyzes the use of AVHRR/NOAA images to detect and evaluate deforestation in the Amazon Forest using TM/Landsat images for validation and calibration of the results. A pilot methodology was developed for the region of "Serra do Roncador", MT, where deforestation is caused by large agriculture and cattle projects. An AVHRR image with spatial resolution of 2 km and geometrically corrected was used to classify areas of deforestation and forest. The identification of these classes and the comparison and validation of the area estimates with the visual interpretation of the TM/Landsat images were based on the use of Geographical Information System. The results of forest and deforestation areas obtained from AVHRR were compared to TM data using statistical analyses and strong linear correlation and regression were found between the data sets ($R^2 = 0.93$). An application of the model for the region of São José do Xingu, MT, with a deforestation pattern similar to that found in the first region, presented adequate results with average errors of 3% for the total forest area. The results corroborated the use of AVHRR band 3 to detect and monitor alterations in forest areas. TM/Landsat data are necessary to calibrate estimates of areas.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xix
 <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</u>	 1
1.1 - Objetivos.....	3
 <u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	 7
2.1 - Desmatamento - Considerações gerais.....	7
2.2 - Detecção de desmatamentos por sensoriamento remoto.....	12
2.2.1 - O espectro da vegetação.....	12
2.2.2 - O espectro do solo.....	16
2.2.3 - Índice de vegetação.....	18
2.3 - Os sistemas sensores.....	21
2.3.1 - O sistema AVHRR/NOAA.....	21
2.3.2 - O sistema TM/LANDSAT.....	26
2.4 - Influência da resolução espacial na precisão de classificação.....	28
2.5 - Uso de imagem dos satélites Landsat e NOAA para detectar e avaliar desmatamentos na Amazônia...	33
2.5.1 - Os sistemas sensores MSS e TM/Landsat em es- tudos de desmatamento da floresta amazônica..	33
2.5.2 - O sistema sensor AVHRR/NOAA em estudos de desmatamento em florestas tropicais.....	36
2.5.3 - Relações entre estimativas de desmatamentos tropicais com dados AVHRR/NOAA e TM/Landsat..	42
2.6 - Sistemas de Informação Geográfica em estudos de desmatamento.....	44

<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	47
3.1 - Descrição das áreas de estudo.....	47
3.1.1 - Serra do Roncador.....	49
3.1.2 - São José do Xingu.....	51
3.2 - Materiais.....	52
3.2.1 - Aquisição de dados.....	52
3.2.1.1 - Dados TM/Landsat.....	52
3.2.1.2 - Dados AVHRR/NOAA.....	53
3.2.2 - Infra-estrutura operacional.....	54
3.3 - Métodos.....	55
3.3.1 - Interpretação visual de imagens TM/LANDSAT...	57
3.3.2 - Verificação de Campo.....	59
3.3.3 - Avaliação da geometria de Imagem TM/Landsat..	60
3.3.3.1 - Imagem gerada a partir de interpretação visual.....	60
3.3.3.2 - Imagem digital registrada.....	61
3.3.4 - Pré-processamento de imagens AVHRR/NOAA.....	62
3.3.5 - Análise de Histogramas e Cálculo das Estatísticas.....	64
3.3.6 - Classificação Digital de imagens AVHRR/NOAA..	66
3.3.7 - Integração dos dados no SGI.....	68
3.3.8 - Análise estatística dos Resultados.....	73
3.3.9 - Metodologia específica para São José do Xingu	79
 <u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	 81
4.1 - Serra do Roncador.....	81
4.1.1 - Interpretação Visual de Imagem TM/Landsat....	81
4.1.2 - Verificação de campo.....	82
4.1.3 - Precisão da digitalização de dados analógicos	87
4.1.4 - Precisão da imagem digital.....	89
4.1.5 - Navegação e correção da imagem AVHRR/NOAA....	90
4.1.6 - Análise de Histogramas e Cálculo das Estatísticas.....	94

4.1.7 - Classificação Digital da imagem AVHRR/NOAA..	99
4.1.8 - Integração e análise dos dados no SGI.....	108
4.1.9 - Análise estatística dos Resultados.....	113
4.1.9.1 - Análise de correlação.....	113
4.1.9.2 - Intervalo de confiança para média.....	115
4.1.9.3 - Análise de Regressão Linear.....	119
4.1.9.4 - Análise de Resíduos.....	125
4.1.9.5 - Análise dos "outliers".....	130
4.1.9.6 - Análise de regressão sem "outliers".....	132
4.1.9.7 - Tabulação Cruzada e Área Total das Classes.	136
4.2 - São José do Xingu.....	141
4.2.1 - Análise estatística dos resultados	144
4.2.2 - Aplicação do modelo linear	146
 <u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u>	 149
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 155
 APÊNDICE A - REGRESSÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA OBTIDAS COM DADOS TM E AS COMBINAÇÕES DE BANDAS AVHRR UTILIZADAS PARA FLORESTA E DESMATAMENTO + CERRADO.....	 167
 APÊNDICE B - ÁREA ESTIMADA PELO TM E PELAS COMBINA- ÇÕES DE BANDAS AVHRR (km ²), POR UNIDADE AMOSTRAL PARA A SERRA DO RONCADOR.....	 173
 APÊNDICE C - ÁREA ESTIMADA PELO TM AVHRR, COMBINA- ÇÕES X3 E B3 (km ²), E RESULTANTE DA APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR, POR UNIDADE AMOSTRAL, PARA SÃO JOSÉ DO XINGU.....	 175

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Assinatura espectral de um tipo de vegetação e do solo.....	12
2.2 - Função de resposta espectral das bandas 1, 2 e 3 do sensor AVHRR/NOAA.....	23
2.3 - Efeito da resolução espacial na definição de espaços de atributos para as classes.....	29
2.4 - Efeito da presença de pixels de borda na exatidão de classificação.....	31
2.5 - Sensibilidade das bandas AVHRR para detecção de áreas desmatadas.....	37
3.1 - Localização das áreas de estudo.....	48
3.2 - Procedimento metodológico utilizado.....	56
3.3 - Atividades realizadas no SGI.....	69
4.1 - Mapa temático resultante da interpretação visual de imagem TM/Landsat.....	82
4.2 - Aspectos gerais das classes floresta, floresta secundária e vegetação pioneira, verificadas na região da Serra do Roncador.....	83
4.3 - Vegetação pioneira, desmatamento e queimada em área de floresta na região da Serra do Roncador	85
4.4 - Contraste entre as classes floresta, vegetação pioneira e desmatamento.....	86
4.5 - Ocorrência de floresta em domínio de campos-cerrado.....	87
4.6 - Imagem AVHRR/NOAA original, referente à área de estudo.....	91
4.7 - Área de estudo na imagem AVHRR/NOAA, resultante da correção geométrica (2 km de resolução).....	92
4.8 - Histogramas das bandas 1-2-3 AVHRR da área de estudo, imagem original.....	93
4.9 - Histogramas das bandas 1-2-3 AVHRR da área de estudo, imagem corrigida geometricamente.....	94

4.10 - Classificação X3 AVHRR com interpretação visual da imagem TM digitalizada.....	109
4.11 - Efeito visual de erro na sobreposição dos dados TM e AVHRR.....	110
4.12 - Sobreposição de dados TM e AVHRR correta.....	111
4.13 - Interpretação visual de imagem TM/Landsat no formato varredura.....	112
4.14 - Intervalo de confiança ([]) e médias (*) das estimativas de área de desmatamento com cerrado.....	116
4.15 - Intervalo de confiança ([]) e médias (*) das estimativas de área de floresta.....	118
4.16 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pela classificação X3 e TM.....	122
4.17 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pela classificação B3 e TM.....	122
4.18 - Regressão entre área floresta estimada pela classificação X3 e TM.....	124
4.19 - Regressão entre área floresta estimada pela classificação B3 e TM.....	125
4.20 - Plotagem dos resíduos padronizados contra valores estimados de área das classes cerrado e desmatamento X3.....	127
4.21 - Plotagem dos resíduos padronizados + contra valores estimados de área das classes cerrado e desmatamento B3.....	127
4.22 - Plotagem dos resíduos padronizados contra valores estimados de área da classe floresta em X3.....	128
4.23 - Plotagem dos resíduos padronizados contra valores estimados de área da classe floresta em B3.....	128
4.24 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pelas classificações X3 e TM sem a presença de "outliers".....	134

4.25 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pelas classificações B3 e TM sem a presença de "outliers".....	134
4.26 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pelas classificações X3 e TM sem "outliers".....	135
4.27 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pelas classificações B3 e TM sem "outliers".....	135
4.28 - Imagem resultante da interpretação visual de imagem TM/Landsat - São José do Xingu.....	142
4.29 - Imagem classificada B3 AVHRR com digitalização TM sobreposta - região de São José do Xingu...	143

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Extensão de desmatamento bruto na Amazônia Legal Brasileira.....	12
2.2 - Características orbitais e de imageamento do sistema sensor AVHRR/NOAA.....	22
2.3 - Características orbitais e de imageamento do sistema sensor TM/LANDSAT.....	27
2.4 - Matriz de correlação dos cinco canais do AVHRR.	38
3.1 - Cartas topográficas e imagens TM/Landsat referentes às áreas de estudo.....	53
3.2 - Classificações utilizadas na análise estatística.....	75
4.1 - Diferenças entre as coordenadas dos pontos na carta topográfica e na interpretação digitalizada.....	88
4.2 - Correlação entre as bandas AVHRR.....	97
4.3 - Valores de distância J-M mínima e média para as melhores combinações de bandas AVHRR.....	100
4.4 - Média, variância e intervalo de confiança para as classes das bandas AVHRR/NOAA.....	102
4.5 - Classes e intervalos de nível de cinza definidos no fatiamento da banda 1 - AVHRR.....	105
4.6 - Classes e intervalos de nível de cinza definidos no fatiamento da banda 2 - AVHRR.....	106
4.7 - Classes e intervalos de nível de cinza definidos no fatiamento da banda 3 - AVHRR.....	107
4.8 - Classes e intervalos de nível de cinza definidos no fatiamento da banda IV - AVHRR....	108
4.9 - Correlação entre área de floresta estimada pelas classificações TM e AVHRR.....	113
4.10 - Correlação entre área de desmatamento estimada pelas classificações TM e AVHRR.....	114

4.11 - Correlação entre área de desmatamento e cerrado estimada pelas classificações TM e AVHRR.....	115
4.12 - Índices obtidos da análise de regressão linear entre as estimativas de cerrado com desmatamento TM e AVHRR.....	120
4.13 - Índices obtidos da análise de regressão linear entre as estimativas de floresta TM e AVHRR...	123
4.14 - Porcentuais de frequência dos resíduos padronizados para desmatamento com cerrado, e floresta.....	126
4.15 - Estudo porcentual dos sinais dos resíduos padronizados nas estimativas de desmatamento com cerrado e floresta.....	129
4.16 - Análise de regressão linear entre dados TM e AVHRR com e sem a presença dos "outliers".....	133
4.17 - Tabulação cruzada entre os planos de informação X3 e B3 AVHRR, e TM.....	136
4.18 - Comparação entre os resultados obtidos para o uso de imagens AVHRR e LANDSAT em estimativas de desmatamento em floresta tropical.....	140
4.19 - Resultados das análises de correlação e regressão linear com dados TM e AVHRR para a região de São José do Xingu.....	144
4.20 - Média e intervalo de confiança dos valores de áreas das classes em 54 quadrículas para a região de São José do Xingu.....	146
4.21 - Erros obtidos na aplicação da equação de regressão obtida para a região do Roncador na região de São José do Xingu.....	147

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A redução das áreas naturais, em detrimento de seus recursos florísticos e faunísticos, tem sido observada freqüentemente como resultado da ocupação humana e de processos exploratórios. No Brasil, muitos são os fatores que promovem a ocupação desordenada de áreas naturais: crescimento demográfico, acelerada expansão urbana, processos de colonização questionáveis, produção agrícola destinada à exportação e interesses econômicos e políticos diversos. Estes fatores têm favorecido processos de retirada da cobertura vegetal primária e conversão temporária ou permanente do ambiente natural em áreas destinadas especialmente à agricultura e pecuária (Reis e Margulis, 1991).

A Amazônia Brasileira, com aproximadamente 5.000.000 km², tem sido alvo ao longo dos últimos 30 anos de ocupação progressiva principalmente para fins agrícolas e agropastoris. Colonos advindos do sul e nordeste do país, ao instalarem-se na região e com o exercício das práticas de manejo e uso do solo, geralmente inadequadas às condições locais, promovem a retirada indiscriminada de significativas extensões florestais e degradação do ambiente original (Tavares et al., 1972).

As estimativas mais recentes de desmatamento em áreas de floresta na Amazônia Legal Brasileira apresentam o valor de 426.400 km² de desmatamento bruto para data média de agosto de 1991 (incluindo 97.600 km² de floresta secundária, anterior a 1960, e 5.000 km² de áreas inundadas por hidrelétricas) e um de desmatamento de 11.130 km² entre 1990 e 1991 (INPE, 1992).

Torna-se imprescindível o conhecimento dos processos de alteração da floresta amazônica e a comunidade científica, ao analisar a questão amazônica, sugere que sejam aumentados os esforços de pesquisa na área, estudando formas de manejo sustentado e de ocupação para definir um zoneamento econômico para a região (Goldemberg e Barbosa, 1989).

A tecnologia de sensoriamento remoto disponível para estudo da superfície permite a documentação sistematizada e objetiva de informações para avaliação, inventário e monitoramento de desmatamentos de florestas tropicais em grandes extensões como o que ocorre no Brasil (Myers, 1988). Estes desmatamentos tropicais têm sido estudados através de dados de sensoriamento remoto provenientes dos satélites Landsat, SPOT, satélites meteorológicos da National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), e dos dados de radar de abertura sintética (Sader et al., 1990).

Para estudos de desmatamento de grande escala utilizando imagens de alta resolução espacial, como imagens do sensor TM (30 m) a bordo do satélite Landsat ou do sistema HRV/SPOT (10 m), é necessário dispor de exaustivos recursos o que encarece consideravelmente o monitoramento frequente das áreas de alteração (Malingreau e Tucker, 1988). Em muitos casos, devido à estreita faixa imageada e à baixa resolução temporal (185 km, e 16 dias para o sensor TM), a cobertura de nuvens pode impedir a análise frequente de algumas áreas.

Em estudos de desmatamento de grande escala, tem-se utilizado imagens de baixa resolução espacial (1,1 km, nominal) provenientes do sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), a bordo dos satélites

meteorológicos da série NOAA como proposta para aquisição de dados. Isto se deve ao fato do sistema AVHRR/NOAA apresentar, quando comparado ao sistema TM/Landsat, maior frequência de imageamento (cerca de duas imagens por dia) facilitando a obtenção de imagens para análise de desmatamento livres de cobertura de nuvens, e da faixa de imageamento ser muito mais extensa (2.700 km, nominal) permitindo a visão sinóptica da área de abrangência (Hayes, 1985).

Diante do potencial dos dados AVHRR/NOAA para a detecção e monitoramento de desmatamentos em grande escala, torna-se necessário verificar a precisão com que os desmatamentos na Amazônia são estimados e espacialmente localizados em imagens AVHRR. Estas informações são essenciais para se viabilizar uma metodologia de análise geral, de baixo custo operacional e eficiente para detecção e monitoramento de desmatamento na região amazônica em tempo real, cujos resultados possam ser posteriormente detalhados através de sensores de alta resolução.

1.1 - OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo geral analisar as relações entre as áreas de desmatamento na floresta Amazônica classificados digitalmente em imagens NOAA/AVHRR, de baixa resolução espacial, e as áreas delimitadas através da interpretação visual de imagens Landsat/TM, de alta resolução. Para tanto será considerado apenas o padrão de desmatamento decorrente da instalação de projetos agropecuários de médio e grande porte. Investigou-se as várias possibilidades de classificação deste padrão de desmatamento com imagens AVHRR corrigidas geometricamente e com resolução de dois quilômetros. Para isso são utilizadas técnicas de processamento digital das

imagens em bandas isoladas, índice de vegetação e composição de bandas.

Como objetivos específicos, este trabalho apresenta as seguintes propostas:

- analisar as características espectrais das imagens AVHRR quanto às classes discerníveis nos histogramas de suas bandas;
- verificar quais bandas, ou combinações de bandas AVHRR são mais eficientes para classificar digitalmente áreas desmatadas e de floresta, quando comparadas à classificação obtida através de dados TM/Landsat;
- avaliar os erros presentes na classificação de imagens AVHRR, através do detalhamento das classes definida pelos dados TM/Landsat;
- avaliar erros na utilização de imagens analógicas TM/Landsat em substituição às imagens no formato digital, quanto à geometria interna dos dados;
- verificar a viabilidade de integrar dados TM e AVHRR em um sistema geográfico de informação, quanto à sobreposição dos dados;
- definir uma metodologia-teste simples e de baixo custo que possibilite a detecção de áreas desmatadas com o uso de imagens AVHRR nos sistemas de processamento de imagens (SITIM-150) e geoprocessamento (SGI) disponíveis no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e de amplo uso no mercado brasileiro.

- testar a relação numérica/estatística obtida entre os dados TM e AVHRR para uma região, em outra área de padrão de desmatamento semelhante, de modo a verificar a aplicabilidade da relação obtida, buscando assim um fator de ajuste ou calibração dos dados AVHRR em relação aos dados TM.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a teoria relacionada às atividades de detecção de áreas desmatadas em floresta tropical através de dados de sensoriamento remoto.

Apresenta-se a questão do desmatamento; as características de comportamento espectral da vegetação e do solo que permitem a distinção de áreas desmatadas; os sistemas sensores TM/Landsat e AVHRR/NOAA; a influência da resolução espectral na precisão de classificação; e trabalhos que utilizaram imagens TM e AVHRR para estudos de desmatamento.

2.1.- DESMATAMENTO - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste trabalho, seguindo a conceituação de Malingreau e Tucker (1987), desmatamento foi considerado toda atividade antrópica sobre a cobertura florestal original, que a transforma em uma área dominada por gramíneas, arbustos ou destinada a diferentes usos do solo como agricultura e pastagem.

A nível regional os desmatamentos provocam alterações no ciclo hidrológico (Gentry, 1980; Sioli, 1987), lixiviação de nutrientes, erosão e perda da fertilidade do solo (Uhl et al., 1988), extinção de espécies raras que talvez não venham a ser sequer registradas (Reid, 1992, citado por The World Research Institute, 1992) e desequilíbrio do ecossistema com a proliferação de pragas e doenças (Smith, 1981).

Em escala global os desmatamentos podem provocar a longo prazo mudanças na ciclagem de carbono (Sedjo, 1990) com sérios efeitos de concentração deste elemento na atmosfera (Woodwell, 1984; Kirchhoff, 1989), agravando o efeito estufa (Goldemberg, 1989) e causando variações de precipitação (Skula et al., 1990), tendendo à alterações climáticas globais (Molion, 1978).

A floresta tropical da Amazônia Legal Brasileira constitui aproximadamente 66% da área de floresta tropical remanescente na Terra, ocupando 3.370.000 km² correspondentes principalmente a floresta tropical úmida e sazonal (Fearnside, 1982; The World Research Institute, 1990).

As atividades econômicas básicas na região Amazônica até meados do século consistiam principalmente de extrativismo de produtos como a borracha, os minérios, a madeira e a castanha, e que na época exerciam pouca pressão de alteração da cobertura, limitando-se a pequenas clareiras na floresta (não considerando as tentativas de H. Ford de cultivar seringueiras entre 1927 a 1939).

O governo brasileiro, no final da década de 60, visando o desenvolvimento da região norte e sua integração econômica com o resto do país, deu início a uma série de estratégias que incentivaram a ocupação da Amazônia Legal Brasileira, e as conseqüentes atividades de desmatamento (The World Research Institute, 1990).

A expansão da malha viária com a abertura de rodovias como a Belém-Brasília em 1964, Cuiabá-Santarém, Cuiabá-Porto Velho e Transamazônica em 1974, permitiu a migração de colonos do sul e nordeste do país por recursos próprios ou atraídos pelos incentivos econômicos para a

posse da terra (Tavares et al., 1972, Smith, 1981) Estima-se por exemplo, que a rodovia Belém-Brasília atraiu 350.000 imigrantes para a Amazônia no decênio de 1964/74 (Reis e Margulis, 1991).

O efeito da abertura de novas estradas na floresta foi ainda verificado mais recentemente através da observação de focos de queimadas e observações de campo para as datas de 1986 e 87 por Malingreau e Laporte (1988). Estas observações indicaram o movimento espontâneo de migrantes e o surgimento de áreas desmatadas na floresta .

O programa federal de incentivos fiscais para a pecuária na Amazônia (Lei nº 5.173 de 27 de outubro de 1966), de responsabilidade da Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), viabilizou a implantação de vários projetos agropecuários nos anos 70, como o Polonoroeste, a Transamazônica. Estes projetos, como aqueles estabelecidos no nordeste do Mato Grosso e sul do Pará, tinham permissão prevista pelo código florestal para desmatar até o máximo de 50% da área da propriedade (Lei nº 4771, de 15 de novembro de 1965, artigo 16, alínea b citado por Santos e Novo, 1977). Em grande número de casos, burlando a legislação, foram desmatadas extensas e contínuas áreas para a implantação de pastagens com incentivos da política de desenvolvimento para a região (Yokomizo, 1989).

Na década de 70, o Programa Nacional de Reforma Agrária para a Amazônia, com incentivos do Governo Federal, pretendia absorver mão-de-obra de outras regiões do país através da abertura de fronteiras agrícolas (Funtac, 1990). O Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) promoveu o assentamento de colonos em territórios da federação, destinando a terra à

agricultura principalmente, e pastagem. Em Rondônia, da mesma forma como ocorrido no Acre, os colonos receberam lotes de 100 ha ao longo de um sistema extensivo de estradas paralelas ramificando-se a cada 4 km em ângulos retos à uma rodovia, no caso a BR 364, de Vilhena a Porto Velho, penetrando na floresta por distâncias de mais de 80 km, organizando-se nas chamadas "espinha-de-peixe". Esta colonização resultou em um acelerado crescimento demográfico do estado: de 10.000 habitantes em 1960 para 500.000 em 1980, sendo a população atual de aproximadamente 1.020.000 habitantes. Esta foi uma colonização inicialmente planejada e organizada que tomou rumos imprevistos tendo como consequência sérios problema sócio-econômicos para a população, e desmatamento, através de pequenas áreas descontínuas em grandes extensões de floresta (Woodwell et al., 1987; The World Research Institute, 1990).

Fearnside (1986) descrevendo a concentração espacial do desmatamento na Amazônia concluiu que este processo ocorria de forma acelerada e espacialmente muito concentrado. Os núcleos de intenso desmatamento localizados na periferia da Amazônia Legal, nos estados de Rondônia, Mato Grosso e Pará (parte sul), estavam se expandindo conforme a melhoria das via de acesso. O acréscimo das áreas desmatadas foi motivado por imigração para áreas de colonização como Rondônia, e pela expansão de pastagens com propósitos especulativos nas áreas onde a imigração era insignificante.

A expansão dos focos de desmatamentos foi prevista por Fearnside (1986) para outras áreas da região amazônica, juntamente com o crescimento exponencial de áreas desmatada. Este crescimento tenderia a aumentar cada vez menos, contudo sem indícios de decréscimo ou de extinção do processo.

O ano de 1987, segundo Setzer et al., (1988) foi marcado por desmatamento intenso, sugerido como da ordem de 8 milhões de hectares, através da análise dos focos de queimada para a estação seca de 1987, devido provavelmente a este ter sido o último ano em que os incentivos fiscais estavam disponíveis aos fazendeiros.

Com a suspensão dos incentivos fiscais, a pressão internacional, a concentração de esforços pelo Instituto Brasileiro para o Meio Ambiente (IBAMA) para fiscalização de queimadas, e uma crise econômica de vários anos, acompanhou-se a redução da velocidade de desmatamentos nos anos seguintes (The World Research Institute, 1990). A redução do número de focos de queimada em 1990 para a Amazônia Legal sugerem indiretamente esta tendência (Setzer e Pereira, 1989).

Os dados de desmatamento resultantes dos levantamentos elaborados pelo INPE - Projetos PRODES (INPE, 1992) confirmam esta análise. A Tabela 2.1 apresenta os valores de área desmatada na porção da Amazônia Legal pertencente ao domínio florestal, para cada estado. Foram considerados as áreas de regeneração e de replantio de floresta apenas para os estados do Maranhão e Pará.

Observa-se que entre os anos de 88 e 89 e entre 89 e 90, os acréscimos de área desmatada foram maiores que o verificado entre 90 e 91. Exceções encontram-se nos estados do Amapá, Amazonas, Roraima e Tocantins, porém generalizando para a Amazônia Legal a tendência apresentada foi de uma redução da taxa de desmatamento.

**TABELA 2.1 - EXTENSÃO DE DESMATAMENTO BRUTO NA AMAZÔNIA
LEGAL BRASILEIRA (km²)**

ESTADO	JAN 1978	ABR 1988	AGO 1989	AGO 1990	AGO 1991
ACRE	2500	8900	9800	10300	10700
AMAPÁ	200	800	1000	1300	1700
AMAZONAS	1700	19700	21700	222000	232000
MARANHÃO	6100	33000	34500	35600	36300
(*)	63900	90800	92300	93400	94100
MATO GROSSO	20000	71500	79600	83600	86500
PARÁ	16600	91700	99500	104400	108200
(*)	56400	131500	139300	144200	148200
RONDÔNIA	34200	30000	31800	33500	34600
RORAIMA	100	2700	3600	3800	4200
TOCANTINS	3200	21600	22300	22900	23400
AMAZÔNIA LEGAL	54600	280000	303800	317600	328700
(*)	152200	377600	401400	415200	426400

FONTE: INPE (1992), p.3.

(*) valores incluindo desmatamento antigo.

2.2 - DETECÇÃO DE DESMATAMENTOS POR SENSORIAMENTO REMOTO

Este item descreve as relações entre a radiação óptico-eletromagnética do sol com a vegetação e o solo, que determinam as características espectrais destes alvos. Estas características, por sua vez, permitem a diferenciação de florestas naturais e desmatamentos.

2.2.1 - O ESPECTRO DA VEGETAÇÃO

No comportamento espectral de uma cobertura vegetal as folhas são os elementos estruturais que têm papel preponderante na resposta da vegetação. Estas são

coletoras de luz, com pigmentos e adaptações anatômicas que otimizam a interceptação da radiação para a fotossíntese, resultando num padrão próprio de comportamento espectral.

O objeto principal da aplicação da técnicas de sensoriamento remoto da vegetação é o estudo da reflexão difusa da folha, uma vez que a radiação que retorna, após espalhamentos múltiplos (refração e reflexão) no interior das células traz informações sobre a estrutura e estado fisiológico da folha. Este espalhamento ocorre como consequência das diferenças do índice de refração entre os espaços intercelulares com ar, células hidratadas e as facetas irregulares do exterior da célula.

A razão da reflexão difusa pela irradiância solar resulta no índice de reflectância que é o parâmetro característico do alvo, independente das condições de iluminação, de interesse para o sensoriamento remoto.

A Figura 2.1 apresenta o comportamento espectral de uma cobertura, indicando os intervalos espectrais onde as diferentes propriedades biofísicas da vegetação controlam a reflectância da vegetação no intervalo de 400 a 2.500 nm.

A reflectância das folhas é relativamente baixa, não mais que 20%, na porção visível do espectro (400 a 700 nm), onde predomina a absorção pelos pigmentos clorofila a, clorofila b, carotenóides, xantofilas e antocianinas, principalmente. Nas regiões do azul (400 a 480 nm) e vermelho (520 a 700 nm) encontram-se os picos de absorção da radiação eletromagnética pelas clorofilas (443 e 670 nm). A porção de energia do espectro visível incidente que não é absorvida, é amplamente refletida. A

relativa falta de absorção nos comprimentos de onda entre as bandas de absorção da clorofila resulta em um pico de reflectância em aproximadamente 540 nm, na região do verde. Devido à preponderância das clorofilas, os outros pigmentos só são detectados na ausência desta (Grant, 1987).

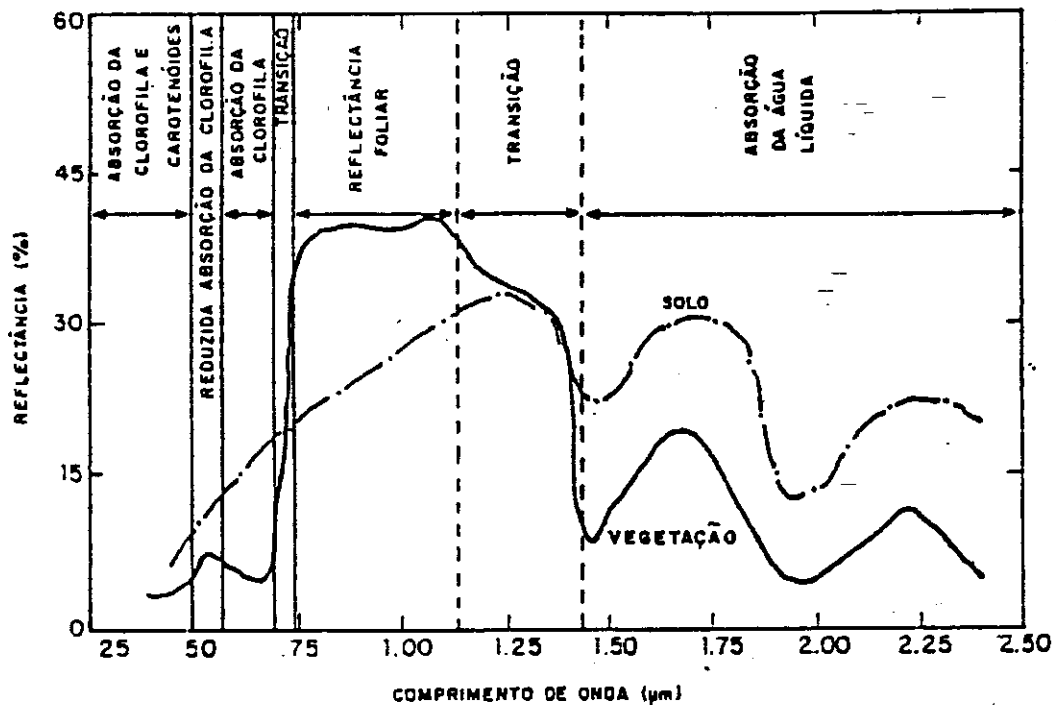


Fig. 2.1 - Assinatura espectral de um tipo de vegetação e do solo.

FONTE: Adaptado de Hoffer (1978), p.232.

Na região do infravermelho próximo (700 a 1300 nm) os pigmentos são transparentes à radiação e a estrutura foliar interna controla a reflectância. A vegetação é caracterizada por reflectância e transmitância intensas e baixa absorbância, quando comparada com o visível. De uma maneira geral, de 45 a 50% da radiação é refletida, de 45 a 50% é transmitida, e apenas 5% é absorvida. O mesmo mecanismo de espalhamento necessário para a fotossíntese resulta em altos valores de

reflectância, isto porque não havendo absorção, este mecanismo aumenta preferencialmente a radiação de retro-espalhamento mais que na direção frontal de espalhamento (Tucker e Sellers, 1986). Nesta porção do espectro as características do mesófilo, condicionando o espalhamento múltiplo, são responsáveis pela reflectância da vegetação (Knippling, 1970). O teor de água nas células das folhas favorece a absorção desta radiação e é responsável pela pressão de turgência, modificando a estrutura interna da folha e o espalhamento da radiação. Verifica-se portanto uma relação entre déficit hídrico, estrutura foliar e da cobertura, com a reflectância no infravermelho próximo (Myers, 1970).

A reflectância de uma cobertura com diversos estratos foliares, quando comparada à de uma única folha, é aproximadamente 85% maior nesta porção do espectro. Isto ocorre devido a reflectância aditiva: a energia transmitida através da primeira camada de folha é refletida pela segunda camada e parcialmente retransmitida através da primeira (Hoffer, 1978).

A região do espectro correspondente ao infravermelho médio (1300 a 3000 nm) é dominada pela alta absorvância causada pelas moléculas de água (picos em 1400, 2000 e 2600 nm), conforme ilustra a Figura 2.1. A absorção da radiação pela vegetação é então uma função da quantidade total de água presente nas folhas, o que por sua vez é função da porcentagem de umidade presente nas folhas e da espessura destas. A banda de absorção da água em 2600 nm é a mais intensa, porém em 1100 nm e 960 nm há um significativo impacto na reflectância particular quando observa-se estratos foliares múltiplos. Desta forma, o sensoriamento remoto para estudo da vegetação, na faixa do infravermelho médio, tem aplicação na detecção de

suprimento de água, e estando este relacionado à estrutura foliar, tem grande potencialidade para detecção de tipologia da vegetação.

Na região termal do espectro (3000 a 20000 nm), a energia resulta basicamente de vibrações moleculares devido à temperatura dos corpos. A radiação termal proveniente da vegetação depende da energia emitida pela folha, de sua emissividade e temperatura absoluta (Gates, 1970). A emissividade para a maioria das superfícies de vegetação pode ser considerada constante ou quase constante (Sader, 1986), porém a temperatura absoluta encontra-se intrinsecamente relacionada com o ambiente circundante, com a fisiologia foliar e com a disponibilidade hídrica. Desta forma, a faixa correspondente ao infravermelho termal é indicada para a detecção de stress hídrico, da composição de florestas e da quantidade de biomassa da vegetação (Gates, 1970).

2.2.2 - O ESPECTRO DO SOLO

Quando comparadas às interações de energia-matéria para a vegetação, as interações do solo são menos complexas, uma vez que toda energia recebida é absorvida ou refletida, não havendo necessidade de se considerar a transmitância através do material como ocorre com a vegetação.

A reflectância dos solos é função de uma série de fatores sendo os principais a textura, os conteúdos de matéria orgânica e umidade, a rugosidade superficial e a presença de óxido de ferro (Lillesand e Kiefer, 1979; Baumgardner et al., 1970). Para efeito de diferenciação entre as respostas espectrais da vegetação e do solo, tem-se que: a textura do solo causa um aumento da

reflectância conforme a redução do tamanho da partícula; o aumento da umidade no solo provoca uma diminuição da reflectância, sem alteração da forma geral da curva espectral (Bowers e Hanks, 1965). O mesmo é observado para o aumento de matéria orgânica, do teor de argila e do óxido de ferro no solo que causam a diminuição de sua reflectância espectral em toda curva (Baumgardner et al., 1970).

Na Figura 2.1 o espectro do solo é apresentado comparativamente ao da vegetação e denota-se que as curvas possuem porções bem distintas que auxiliam a diferenciação entre solo e vegetação. A curva espectral dos solos, quando comparada à da vegetação é caracterizada por maior reflectância que a vegetação na porção do visível. Porém, na região do infravermelho próximo, a vegetação reflete muito mais que o solo devido às reflexões e transmissões que ocorrem nos estratos foliares. A partir de 1300 nm, o solo reflete mais intensamente que a cobertura vegetal, isto porque a cobertura vegetal, normalmente com maiores teores de água, deve apresentar menor reflectância que o solo exposto. Estas porções do espectro propiciam a diferenciação entre estes alvos (Myers, 1970).

Na região do espectro correspondente ao infravermelho termal, verifica-se um maior aquecimento do solo durante o dia quando comparado a vegetação. A redução na evaporação e a redistribuição entre calor sensível e latente levam a um aumento diferencial na temperatura entre as duas superfícies (Myers, 1970). Esta diferença é mais contrastante na época seca, porque o solo tem sua condutividade térmica diminuída tornando-se mais quente, e é quando ocorre o aumento do albedo da vegetação seca ou senescente (Malingreau e Laporte, 1988).

Um recurso apropriado para diferenciar coberturas é o uso de mais de uma banda de comprimento de onda. Por exemplo, um solo visualmente claro tende a possuir reflectância similar à vegetação na porção do infravermelho próximo, contudo, utilizando dados do visível ou infravermelho médio, estes alvos podem ser facilmente separados, uma vez que este solo claro provavelmente terá reflectância muito maior que a vegetação (Hoffer, 1978).

Quanto à variação espectral de feições de desmatamento ao longo do tempo, Horler e Ahern (1986) observaram, utilizando imagens do sensor TM/Landsat, um decréscimo de reflectância no visível conforme aumentava a contribuição da vegetação para a reflectância do solo, observável na região do visível referente ao azul e vermelho. A reflectância no infravermelho médio foi observada muito alta após o desmatamento, decrescendo rapidamente após o início da rebrota, indicando a eficiência desta faixa do espectro para estudos de regeneração.

2.2.3 - ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Muitos índices de vegetação têm sido propostos baseados na premissa de contraste espectral da reflectância entre a vegetação e os elementos de fundo na cena (Rouse et al., 1974; Kauth e Thomas, 1976; Richardson e Wiegand, 1977; Tucker, 1979; Jackson, 1983).

Todos índices são de uma forma geral computados pelo cálculo da diferença, e/ou razão entre medidas tomadas na região do visível e infravermelho próximo do espectro. Este cálculo minimiza os efeitos variáveis de brilho do fundo enquanto enfatiza variações

das medidas decorrentes da variação da densidade de vegetação (Goward et al., 1985).

O significado físico dos índices de vegetação espectrais têm sido estudados intensivamente. Trabalhos de campo, principalmente para alvos agrícolas e gramíneas têm mostrado que os índices de vegetação espectrais correlacionam-se não linearmente com o índice de área foliar e biomassa verde da cobertura (Blair e Baumgardner, 1977; Holben et al., 1980). Contudo estas relações são restritas a determinadas espécies e seus valores saturam em níveis de índice de área foliar e biomassa específicos.

O índice de vegetação de diferença normalizada (IVDN) é representativo de vários índices de vegetação espectrais (Rouse et al., 1974) e é dado por:

$$IVDN = \frac{IV - V}{IV + V}$$

onde: IV = medida espectral do infravermelho próximo

V = medida espectral no visível (região do vermelho)

O IVDN calculado a partir de imagens AVHRR dos satélites NOAA tem sido utilizado para monitoramento global da vegetação porque as alterações provocadas por condições de iluminação, declividade da superfície e geometria de visada são parcialmente compensadas pelo índice. Em cenas com vegetação, o IVDN possui a amplitude de 0,1 a 0,6, e os maiores valores encontram-se associados a coberturas vegetais de alta densidade. Efeitos atmosféricos como espalhamento por partículas e aerossóis, espalhamento de Rayleigh, e nuvens de dimensão menores que o "pixel", atuam para aumentar o valor da radiação registrada pela banda do visível em relação à banda do infravermelho próximo e reduzir o valor do índice de

vegetação. Este efeito torna-se mais evidente em ângulos de imageamento maiores, e pode ser minimizado na elaboração de imagens mosaicos que registraram os maiores valores de IVDN para os pixels da cena (Tarpley et al., 1984; Holben, 1986).

Holben e Fraser (1984) observaram que a resposta de IVDN resultante das bandas do sensor AVHRR, correspondente à vegetação, foi minimizada em ângulos extremos para retroespalhamento e maximizada próximo ao nadir na direção frontal de espalhamento. Constataram ainda que para uma dada densidade de biomassa, aumentando o conteúdo de aerossol aumenta-se a faixa dos valores de IVDN ao longo da linha de imageamento. Esta resposta reduz efetivamente a separação da vegetação em diferentes densidades, e é um problema que se agrava em coberturas de biomassa foliar densa.

Foi observado que o IVDN para formações de características sempre-verde como a floresta Amazônica, apresenta algumas variações ao longo do ano atribuíveis à fenologia da comunidade ou à influência das condições atmosféricas. Estas variações devem ser consideradas para a utilização deste índice, assim como a presença de umidade atmosférica, fumaça e neblina que impedem seu uso regular (Malingreau e Tucker, 1987).

Sader et al. (1989) estudando floresta tropical e temperada, através de IVDN de imagens TM, observaram que este índice é fortemente influenciado por efeito da topografia: em locais isentos de variações no terreno, o índice foi eficiente para predizer biomassa total em floresta temperada homogênea, apresentando resposta linear para os diferentes estágios de sucessão secundária da vegetação; e em floresta tropical não foi

verificada nenhuma relação com a biomassa, e não se diferenciou de forma precisa o estágio sucessional da floresta. Contudo, o índice IVDN mostrou-se indicado para detecção de mudanças em florestas tropicais de relevo pouco acidentado como a floresta Amazônica.

2.3 - OS SISTEMAS SENSORES

Este item tem a finalidade de descrever as características dos sistemas sensores para detecção e monitoramento de desmatamentos.

2.3.1 - O SISTEMA AVHRR/NOAA

A bordo dos satélites meteorológicos da série NOAA, o sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) fornece dados nas porções do visível, infravermelho próximo e termal do espectro eletromagnético, por um sistema de varredura transversal ("cross-track") de imageamento (Kidwell, 1991).

As principais características do sistema sensor e dos parâmetros orbitais dos satélites podem ser observados na Tabela 2.2, e são descritos na sequência, segundo Schwalb (1978) , Kidwell (1991) e Hayes (1985).

Apesar dos canais espectrais terem sido escolhidos para proporcionar parâmetros hidrológicos, oceanográficos e meteorológicos, o sistema possui características que possibilitam estudos de monitoramento da vegetação.

**TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS ORBITAIS E DE IMAGEAMENTO DO
SISTEMA SENSOR AVHRR/NOAA**

Ciclo de cobertura	9 dias
Ângulo de imageamento	55,4 graus
Cobertura do terreno	2700 km
Altura orbital	833 km
Período orbital	102 min
Número de órbitas/dia	14,1
IFOV	1,39-1,51 mrad
Resolução de terreno	1,1 km (nadir)
	2,4 km (âng. orbital máximo)
	6,9 km (âng. visada máximo)
Quantização	10 bits
Horário	
Cruzamento com Equador	Des. Asc.
(NOAA 10 e 12)	07:30 19:30
(NOAA 9 e 11)	02:20 14:20
Canais Espectrais	
	(nm)
Banda 1	580 - 680
Banda 2	725 - 1.100
Banda 3	3.550 - 3.930
Banda 4	10.300 - 11.300
Banda 5	11.500 - 12.500

FONTE: Adaptada de Kidwell (1991), p. 3-1.

O canal 1 corresponde à região visível do espectro onde há o pico de absorção da radiação pela clorofila (670 nm), relacionado-o à atividade fotossintética da vegetação.

A Figura 2.2 apresenta a função de resposta espectral das bandas 1, 2 e 3 do sensor AVHRR, onde observa-se que o pico de absorção da clorofila é compreendido pela faixa de resposta da banda 1 com grande sensibilidade a este comprimento de onda.

O canal 2 encontra-se na porção infravermelho do espectro onde a reflectância desta

radiação pela vegetação é intensa. Associados, os canais 1 e 2 permitem inferir sobre a fitomassa presente na comunidade florestal (Tucker, 1979).

O canal 3 corresponde ao infravermelho termal, sensível a temperaturas entre -93°C a $+47^{\circ}\text{C}$. Este canal tem a particularidade de detectar tanto a radiação térmica emitida, quanto a radiação refletida pelos alvos. É um canal que produz imagens difíceis de serem interpretadas. Kidwell (1991) o considera inutilizável, diante da grande incidência de ruídos. Porém, esta banda constitui uma fonte de informação interessante para monitoramento de queimadas (Pereira e Setzer, 1992), e estudo da evolução espaço-temporal da vegetação na zona tropical úmida por ser menos afetada pelo vapor d'água que os canais 4 e 5 (Laporte, 1990).

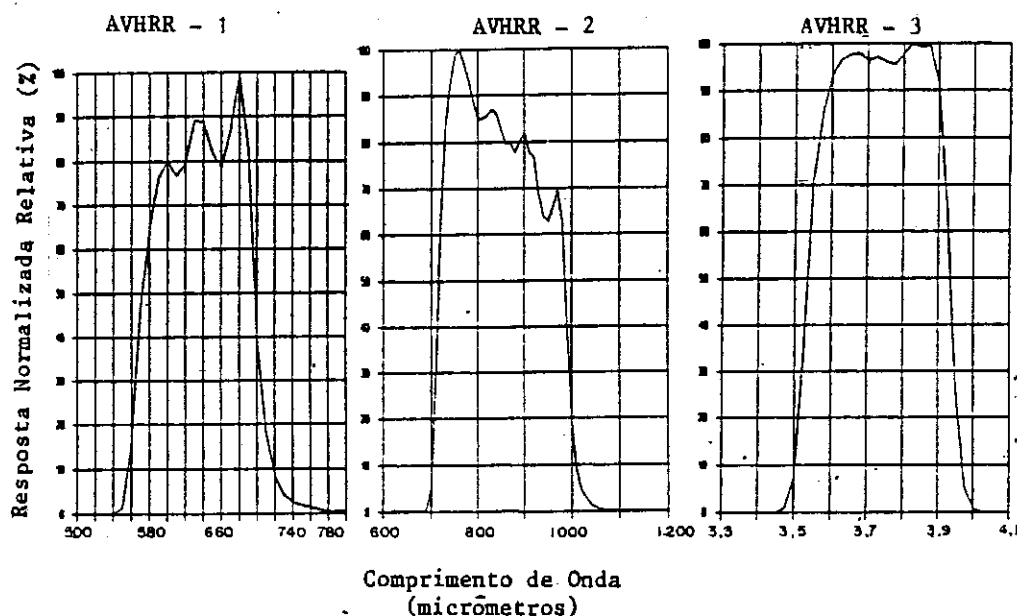


Fig. 2.2 - Função de resposta espectral das bandas 1, 2 e 3 do sensor AVHRR/NOAA.

FONTE : Kidwell (1991) p.1-56; 1-57; 1-58.

Os canais 4 e 5 são os mais utilizados para estudos climatológicos e referem-se à porção termal do espectro, onde a energia emitida pelos alvos é detectada. Esta faixa do espectro também contribui para a separar vegetação e solo.

Os dados radiométricos são quantizados em 10 bits, proporcionando uma resolução radiométrica de 1024 níveis de cinza. Contudo, a leitura da imagem, utilizando a infra-estrutura disponível no INPE, ocorre em 8 bits, eliminando os dois últimos bits de cada registro, o que degrada a resolução radiométrica para 256 níveis de cinza.

O IFOV do sensor é de aproximadamente 1,4 milirad, do qual é derivada uma resolução espacial nominal de 1,1 km no nadir, para uma altitude nominal de 833 km. As regiões marginais da imagem apresentam pixels de até 2,4 x 6,9 km, reduzindo em geral a área útil à porção central de 3/5 da imagem. A faixa total de imageamento corresponde a 2700 km, sendo a área útil de aproximadamente 1000 km, permitindo uma visão sinóptica de quase toda extensão do território brasileiro dependendo da órbita.

Holben e Fraser (1984) observaram que a resposta do sensor AVHRR para a separação de diferentes densidades de vegetação é modificada em função da distância da trajetória atmosférica da radiação e é essencial para os valores das bandas do visível, infravermelho próximo e IVDN. Este efeito pode ser minimizado por boas condições atmosféricas e visadas em grandes ângulos zenitais (próximas ao nadir).

Os satélites da série NOAA, tanto enviam continuamente os dados do sensor AVHRR em tempo real, HRPT (High Resolution Picture Transmission), como podem

registrar estes dados à bordo sob programação especial e transmiti-los subsequenteemente, constituindo os chamados dados LAC (Local Area Coverage), utilizados em estudos de áreas desprovidas de estação receptora de imagens.

Segundo Kidwell (1991) há também a possibilidade de gravação com amostragem contínua para que cada pixel contenha o valor médio de 5 colunas a cada 3 linhas de varredura, apresentando resolução espacial de 4,0 x 3,3 km (genericamente 4 km), constituindo os dados GAC (Global Area Coverage).

O Índice de Vegetação Global (GVI) é outro produto padrão da NOAA derivado da aquisição de dados GAC por 7 dias consecutivos, reamostrados para a resolução de 20 km, projetado para o formato estereográfico polar, registrando os maiores valores de índice de vegetação de diferença normalizada para a composição da imagem. Holben (1986) apresenta as limitações e recomendações do uso de GVI para estudos de dinâmica da vegetação.

A órbita quase-polar, hélio-síncrona dos satélites NOAA e o período orbital de 102 minutos, implicam na execução de 14,1 órbitas por dia. Por este número de órbitas não ser inteiro, a varredura sub-orbital não se repete diariamente, apesar da hora solar local manter-se inalterada a qualquer latitude. Estas características orbitais proporcionam a aquisição de mais de 3 imagens a cada 9 dias e cobertura quase que diária de uma cena se forem consideradas as passagens em que esta se encontre nas bordas da imagem.

Os horários diurnos de passagem dos satélites NOAA podem ser inconvenientes para determinadas aplicações. Para os satélites da série de números pares, o

horário implica em baixos ângulos de iluminação solar em baixas latitudes, e para os satélites da série de números ímpares, o horário é propício para a presença de cobertura de nuvens na região Amazônica.

Porém, ao se considerar a característica de resolução temporal, juntamente com a resolução espacial do sistema AVHRR/NOAA, podem ser imageadas diariamente extensas porções do terreno. Estes atributos habilitam a utilização de dados AVHRR para estudo de desmatamento na região amazônica, haja visto a frequente cobertura de nuvens e a extensão de áreas em processo de desmatamento na Amazônia Legal.

2.3.2 - O SISTEMA TM/LANDSAT

O sensor Thematic Mapper (TM), à bordo do satélite ambiental Landsat-5, tem suas características de imageamento e órbita resumidos na Tabela 2.3 e descritas a seguir, segundo Freden e Gordon (1983) e NASA (1972).

As bandas espectrais 3 e 4 do TM são correspondentes às bandas 1 e 2 do sensor AVHRR, diferindo quanto a amplitude do espectro que abrangem.

Os dados radiométricos do sensor são quantizados em 8 bits determinando uma resolução radiométrica de 256 níveis de cinza, semelhante à disponível em imagens AVHRR degradadas. Com IFOV de 42 rad e altitude nominal do satélite de 705,3 km, a resolução espacial do sistema é de 30 m, sendo que uma imagem corresponde a 185 km de faixa de imageamento.

TABELA 2.3 - CARACTERÍSTICAS ORBITAIS E DE IMAGEAMENTO DO SISTEMA SENSOR TM/LANDSAT

Ciclo de cobertura	16 dias
Ângulo de imageamento	14,9°
Cobertura do terreno	185 km
Altura orbital	705 km
Período orbital	84,4 min
Inclinação orbital	99°11'
Número de órbitas/dia	14 9/16
IFOV	42 rad
Resolução de terreno (*)	30 m
Quantização	8 bits
Horário de Cruzamento com Equador	09:45

Canais Espectrais	Comprimento de onda (nm)
Banda 1	450 - 520
Banda 2	520 - 600
Banda 3	630 - 690
Banda 4	760 - 900
Banda 5	1.550 - 1.750
Banda 6	10.400 - 12.500
Banda 7	2.080 - 2.350

* banda 6 possui 120 m de resolução espacial

FONTE: Adaptada de Freden e Gordon (1983), p.549.

A principal diferença entre os sensores encontra-se na resolução espacial. O TM possui a vantagem de permitir a verificação de feições pequenas, não distintas em imagens AVHRR, mas em contrapartida requerem muitas imagens para permitir a visualização de cenas de grandes extensões.

O satélite possui órbita polar, heliossíncrona, com período orbital de 84,4 min que implica na execução de 14 9/16 órbitas por dia, e resolução temporal de 16 dias. Esta resolução dificulta a aquisição de imagens em áreas onde a cobertura de nuvens é frequente, como ocorre na região amazônica.

Os sensores TM e AVHRR apresentam informações complementares, o que justifica o uso integrado destes dois sensores para estudos de alterações da dinâmica da superfície terrestre como são as atividades de alteração da cobertura florestal (Malingreau e Laporte, 1988; Sader et al., 1990).

2.4 - INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NA PRECISÃO DE CLASSIFICAÇÃO

A resolução espacial pode ser definida como a distância mínima entre dois objetos que um sensor pode registrar distintivamente; em termos de propriedade geométrica do sistema de imageamento, a resolução espacial é descrita pelo IFOV ("Instantaneous Field Of View"). Um valor de IFOV pode não ser uma indicação real do menor objeto que pode ser detectado. Um objeto de dimensão inferior ao IFOV, com suficiente contraste em relação ao fundo, pode alterar a radiância geral de um dado pixel, e assim ser detectado (Simonett, 1983).

O aumento da resolução espacial não significa necessariamente que haja incremento na precisão de classificação da imagem; o aumento da resolução aumenta a quantidade de informação a ser processada, o que pode dificultar sua operacionalidade (Townshend, 1980).

Segundo Joyce e Sader (1986) o efeito de resolução espacial na classificação está relacionado à cena e suas variáveis dependentes, como a dimensão do campo de visada, a configuração espacial das classes, a mistura dos tipos de uso do solo, a variabilidade espectral em cada uma destas classes, e do tipo de algoritmo a ser utilizado na classificação.

Segundo Markham e Townshend (1981) há a ação conjunta de dois fatores afetando a exatidão de classificação em função da resolução espacial. O primeiro é a heterogeneidade espectral das classes de uso do solo - chamados de "ruídos da cena". O ruído da cena tende a ser mediado em resoluções espaciais mais baixas. Esta média resulta na redução do tamanho da distribuição espectral ocupada no espaço de atributos pelas classes de cobertura. Isto implica geralmente em menor sobreposição com outras classes, resultando em precisões de classificações maiores, conforme ilustrado na Figura 2.3. Esta figura ilustra as mudanças na sobreposição das classes de uso do solo definidas pelos canais 3 e 4 TM (as dimensões das elipses foram definidas pelo desvio padrão das classes em cada canal).

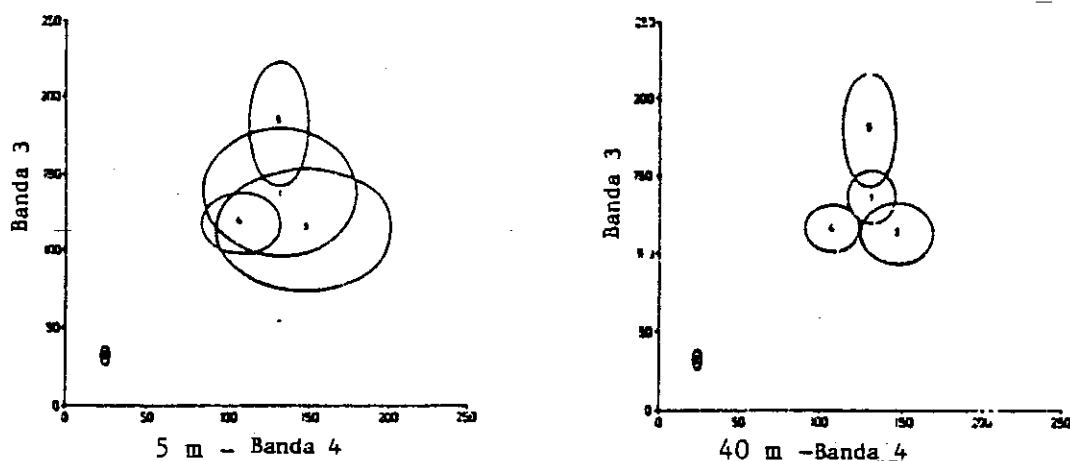


Fig. 2.3 - Efeito da resolução espacial na definição de espaços de atributos para as classes.

FONTE: Markham e Townshend (1981), p.1088.

Como segundo fator, tem-se uma alta ocorrência de bordas entre as classes, que implicam em pixels misturados conforme a resolução é degradada. Os pixels de borda irão conter a resposta mista de duas ou

mais classes de cobertura. Estes pixels podem ser classificados como uma de suas classes constituintes, principalmente se há uma predominante, ou podem ser classificados como outra classe não contida nas bordas. Em geral, o aumento da porcentagem de pixels de borda em resoluções menores tenderá a diminuir a precisão de classificação.

Alguns estudos têm examinado o problema de ruído de cena e têm mostrado pequena mudança na precisão de classificação para pixels distantes de bordas de classes com a degradação da resolução espacial. A presença de pixels de borda, como ilustra a Figura 2.4, ocasiona resultados de classificação mais pobres em baixas resoluções comparativamente a situações onde estes pixels não são considerados (Sadowski et al., 1977).

A Figura 2.4 apresenta a comparação do desempenho de classificação para as áreas de treinamento e feições classificadas incluindo e excluindo-se os pixels de borda.

Avaliando o efeito da resolução espacial na classificação, Markham e Townshend (1981), entre outras conclusões, verificaram que: 1) o efeito de borda e o ruído da cena podem se compensar, mantendo a exatidão de classificação constante para várias resoluções espaciais; 2) o efeito de borda domina sobre o ruído da cena em área de grandes alvos e em resoluções mais baixa que 40 m; e 3) que na classificação das bandas espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal o efeito da degradação da resolução é o mesmo.

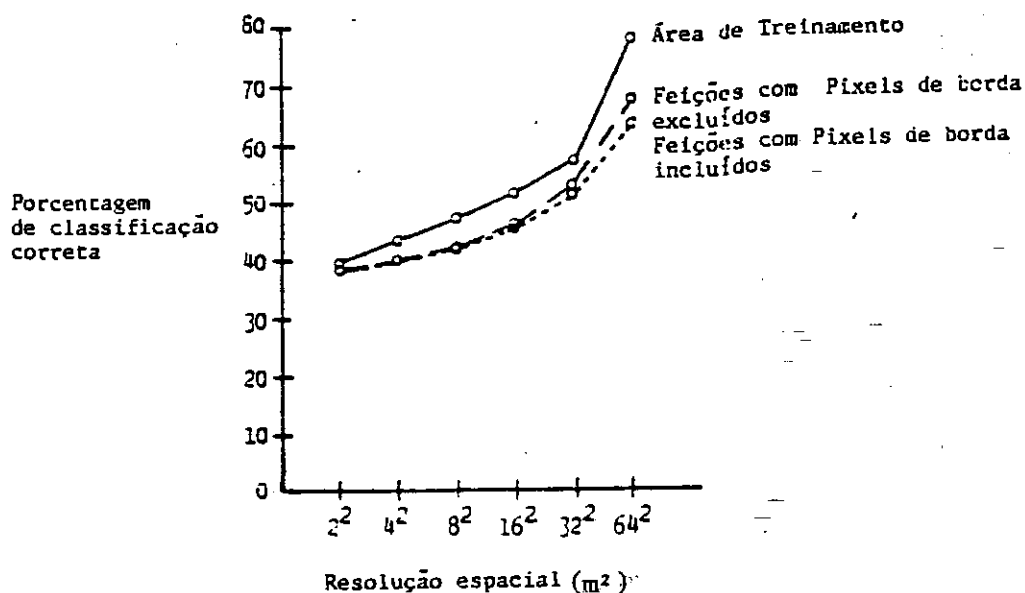


Fig. 2.4 - Efeito da presença de pixels de borda na exatidão de classificação.

FONTE: Sadowski et al. (1977), p.1287.

Gervin et al. (1985), trabalhando com imagens MSS e AVHRR para avaliar exatidão de classificação, encontraram que os dados AVHRR apresentam pequena exatidão de mapeamento, da ordem de 35%, para as feições menores que sua resolução espacial, principalmente quando em padrões separados e com feições estreitas. Contudo, a exatidão de classificação geral dos sensores MSS e AVHRR não diferiram significativamente (71,9% para MSS e 76,8% para AVHRR), e recomendou-se o uso de dados multitemporais AVHRR para mapeamento regional de classes de uso do solo homogêneas e extensas, devido à facilidade computacional dos dados AVHRR.

Townshend e Justice (1988) avaliando o efeito da resolução espacial na detecção de diferentes alterações na superfície, descreveram o modo pelo qual a

resolução espacial do sensor interfere na detecção de desmatamentos em Rondônia e no Mato Grosso. Para este trabalho foram utilizadas imagens MSS de datas diferentes, bandas do vermelho e infravermelho próximo, que tiveram a resolução espacial degradada (125, 500, 1000, 2000 e 4000 m). Fez-se o registro entre as imagens, a subtração entre elas, e a imagem IVDN, procurando relacionar a detecção dos padrões espaciais de desmatamento com cada resolução.

Os autores observaram que com menores resoluções, de uma forma geral, o contraste da imagem é diminuído, visto que o desvio padrão dos níveis de cinza decresce, e conseqüentemente sua variância. A entropia calculada para as imagens também decresce, porém não de maneira constante, e dependendo do padrão espacial e extensão do desmatamento, observaram-se diferentes tendências.

Como resultado, Townshend e Justice (1988), verificaram para o estado do Mato Grosso, de desmatamentos em geral com limites retilíneos e espectralmente distintos, que a degradação da resolução espacial não causou perda de informação, denotada pelo desvio padrão, e não foi justificado o uso de resoluções mais altas, visto que a frequência espacial da imagem não se alterou muito nas diferentes resoluções. Houve perda de detalhes com degradação da resolução, sem contudo haver perda do padrão espacial de desmatamento. Em estudos no estado de Rondônia, onde a alteração do limite de desmatamento não é acompanhada por alteração marcante de contraste, os autores verificaram que a degradação da imagem provocou aumento da entropia. Este fato indicou a existência de mais benefícios na utilização de resoluções mais baixas que em resoluções intermediárias ao se considerar o tempo de computação

dispendido, apesar de alguma perda de informação entre resoluções de 250 a 1000 m.

2.5 - USO DE IMAGENS DOS SATÉLITES LANDSAT E NOAA NA DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESMATAMENTOS NA AMAZÔNIA

São apresentados a seguir trabalhos que utilizaram dados dos sistemas sensores MSS e TM/Landsat e AVHRR/NOAA, para estudos de desmatamento enfatizando-se os procedimentos metodológicos utilizados para extração das informações desejadas.

2.5.1 - OS SISTEMAS SENSORES MSS E TM / LANDSAT EM ESTUDOS DE DESMATAMENTO DA FLORESTA AMAZÔNICA

O monitoramento da floresta amazônica, devido a sua extensão, só é viável através de dados de sensoriamento remoto. Os satélites de observação da Terra, principalmente os da série Landsat têm sido utilizados para o monitoramento desta região.

Inicialmente, com as imagens disponíveis a partir de 1973, foram utilizadas as imagens do sensor MSS (Multispectral Scanning Subsystem) de resolução espacial de 80 m, bandas 5 (600 a 750 nm) e 7 (800 a 1.100 nm), correspondentes ao vermelho e infravermelho próximo, relacionadas com características espectrais da distinção entre solo e vegetação descritas anteriormente.

A SUDAM, no ano de 1975, com a responsabilidade de regulamentar e fiscalizar a distribuição de incentivos fiscais às atividades agropecuária para a região amazônica, estabeleceu um convênio com o INPE. Este convênio tinha por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia com o uso de imagens

MSS/Landsat e técnicas de extração de informações através da interpretação visual de imagens, para controlar grandes empreendimentos agropecuários, assim como o desmatamento provocado numa área piloto no estado do Mato Grosso (Santos et al., 1979a).

Esta metodologia, utilizada para a área piloto em 1975, foi expandida mais tarde para estimativas de toda a Amazônia Legal (Tardín et al., 1980).

Em 1977, o INPE associado ao IBAMA (antigo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal - IBDF) determinou o uso de imagens MSS/Landsat e interpretação visual para levantamento de recursos florestais brasileiros, prevendo ainda o cálculo da extensão da Amazônia Legal desmatada (Santos et al., 1979b).

Com os resultados dos cálculos de desmatamento da Amazônia Legal entre 1973 e 1978 feitos com imagens MSS, o IBDF produziu um inventário de desmatamento para 1978, onde foram definidas áreas críticas desmatadas. Estas áreas passaram a ser monitoradas e acompanhadas periodicamente (IBDF, 1988).

Com o advento do sensor TM, em 1982, de resolução de 30 m, os estudos de desmatamento ganharam o incremento da composição colorida 3, 4 e 5 com a informação de um canal médio (banda 5), indicada por Nelson et al. (1984) para distinguir diferentes feições de cobertura. Esta composição colorida é a que melhor permite a discriminação entre a cobertura vegetal primitiva e as áreas alteradas por corresponder às faixas do espectro onde há melhor distinção entre solo e vegetação, como descrito anteriormente.

A interpretação visual desta composição de bandas foi amplamente utilizada na avaliação de desmatamento da Amazônia Legal como as realizadas pelos projetos PRODES-INPE, nas suas várias etapas: estimativa para o ano de 1988 (Tardin e Cunha, 1989); Atlas de Alteração da Cobertura Florestal da Amazônia Legal (INPE, 1989); estimativa para o ano de 1989 (Tardin et al., 1990); e estimativas mais recentes de desmatamento de toda a Amazônia Legal para os anos de 1988, 1989, 1990 e 1991 (INPE, 1992).

A Fundação de Tecnologia do Acre (FUNTAC, 1990), utilizou as bandas 3 e 4 do sensor TM, juntas e separadamente, em técnicas de interpretação visual de imagens para o mapeamento e quantificação dos desmatamentos e análise do uso da terra para o estado do Acre. A banda 3 foi utilizada para identificar áreas de ação antrópica e a banda 4 para seu detalhamento e reconhecimento da hidrografia. A metodologia empregada mostrou-se eficiente para o objetivo proposto.

Para a contagem de área nestes trabalhos, foram utilizadas técnicas de planimetria (grade milimetrada sobreposta aos "overlays" contendo a interpretação ou através de planímetro), e algoritmos em microcomputadores que, através da digitalização de polígonos em mesa digitalizadora, fornecem as áreas de desmatamento (Tardin et al., 1990), ou ainda sistema geográfico de informação para os cálculos de área (INPE, 1992).

Na avaliação de projetos agropecuários do Pará, Medeiros et al. (1989) utilizaram imagens TM, bandas 3, 4 e 5 em um procedimento integrado da interpretação visual com análise digital para gerar subsídios de modo a orientar e auxiliar o sistema de avaliação e fiscalização

de projetos da SUDAM. Utilizou-se imagens na composição colorida para a classificação digital com o método do "paralelepípedo", e a composição colorida juntamente com as bandas isoladas para a interpretação visual. A banda 5 apresentou a melhor discriminação dos alvos, seguida pela banda 4. A banda 3 não contribuiu significativamente para a classificação, pelo fato de apresentar informações redundantes à banda 5. Esta metodologia produziu mapas preliminares que reduziram a demanda de trabalho de campo.

Em estudos onde foi utilizada uma única banda para discriminação de desmatamentos, a banda TM 5 foi considerada a mais indicada, assim como para diferenciar as fases de sucessão da vegetação degradada; esta banda tem a vantagem de ser a banda que menos sofre influência da atenuação atmosférica (Horlen e Ahern, 1986).

2.5.2 - O SISTEMA SENSOR AVHRR/NOAA EM ESTUDOS DE DESMATAMENTO EM FLORESTAS TROPICAIS

Para o uso de imagens AVHRR/NOAA no estudo de desmatamento em florestas tropicais são utilizadas técnicas de classificação digital e a interação com dados de sensores de alta resolução para a detecção de desmatamentos.

Malingreau e Laporte (1988), estudando projetos agropecuários no Mato Grosso, apresentam graficamente a sensibilidade das bandas do sensor AVHRR para detecção de desmatamentos, que pode ser observada na Figura 2.5. Esta figura apresenta uma representação em 3D de dados AVHRR para desmatamento em projeto agropecuário de extensão de 18 x 16 km, no estado de Mato Grosso (o eixo vertical encontra-se em escala de nível de cinza).

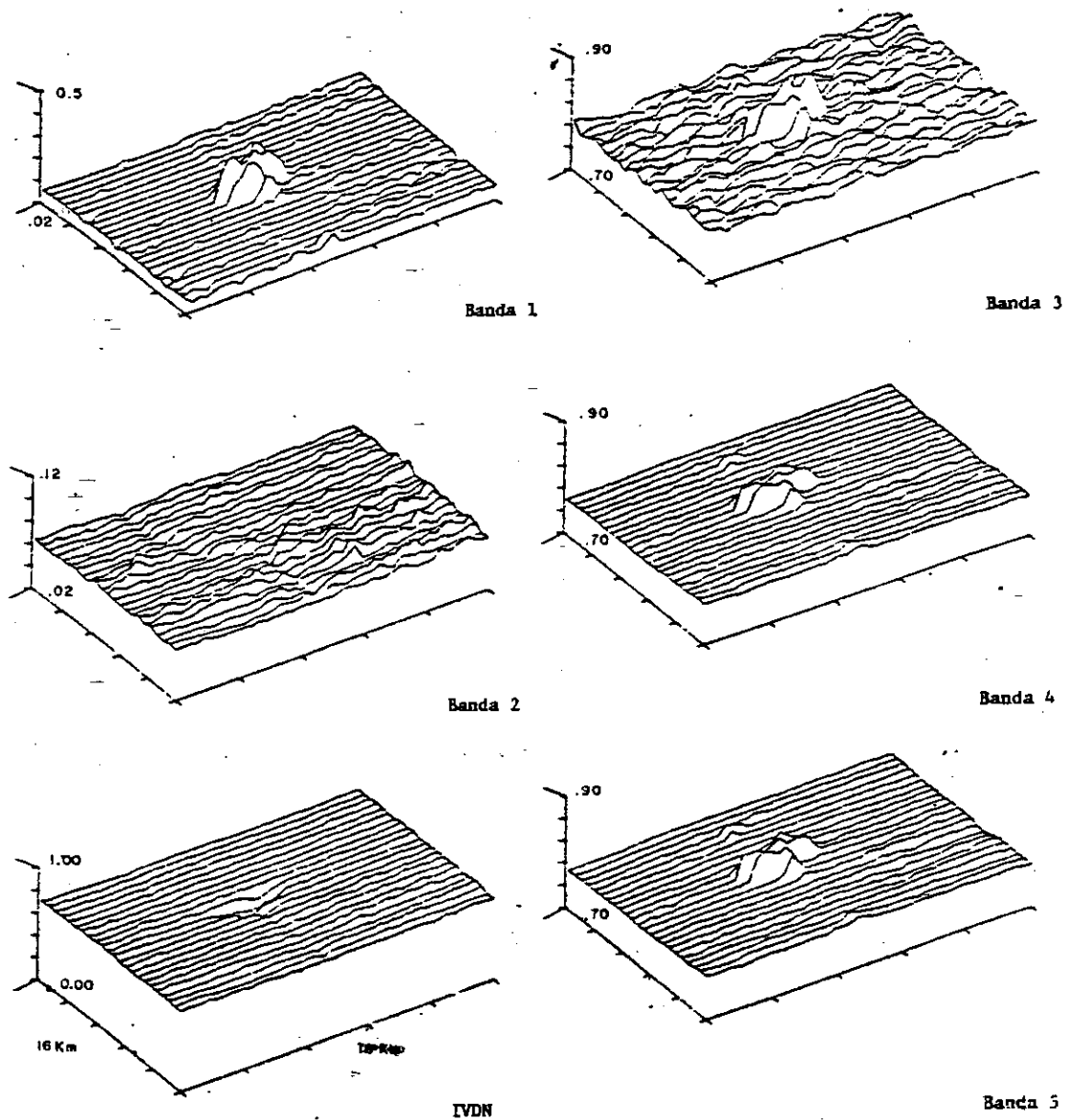


Fig. 2.5 - Sensibilidade das bandas AVHRR para detecção de áreas desmatadas.

FONTE: Malingreau e Laporte (1988), p.7.

O canal 1 e os canais termais apresentam a área de desmatamento na forma de ilhas em função da

presença de solo exposto que reflete e emite mais intensamente nestas bandas, respectivamente; o canal 2 praticamente não distingue a área desmatada e a combinação IVDN apresenta uma redução de valores para a região desmatada.

Chen e Shimabukuro (1991) avaliando a utilização de uma imagem AVHRR para região de Rondônia, obtiveram baixa correlação entre as bandas 1, 2 e 3 AVHRR, conforme apresentado na Tabela 2.4. A maior correlação foi encontrada entre as bandas 3 e 4.

TABELA 2.4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS CINCO CANAIS DO AVHRR

Canal AVHRR	1	2	3	4	5
2	0.58	1.00			
3	-0.29	-0.01	1.00		
4	-0.40	-0.15	0.90	1.00	
5	-0.01	0.11	0.45	0.33	1.00

FONTE: Chen e Shimabukuro (1991), p. 946.

Para a classificação que objetivou distinguir florestas e desmatamentos, a melhor composição de bandas foi a constituída pelos canais 2, 4 e 5 AVHRR. Os autores utilizaram os algoritmos de paralelepípedo e "Maxver", sem alcançar resultados satisfatórios para identificar as diferentes formações florestais da região. Verificaram ainda alguma confusão entre as classes de floresta, savana e áreas desmatadas. Os autores aconselham a interpretação visual do canal 3 para a discriminação entre as áreas de floresta, não-floresta e área desmatada.

Para um sistema de alarme, estes resultados da banda 3 detectariam as áreas de desmatamento e o uso de dados TM/Landsat para a quantificação de área.

- A banda 3

A banda 3 AVHRR foi considerada por Tucker et al. (1984), a mais sensível na diferenciação entre as classes de desmatamento e floresta através de seus níveis digitais (46 níveis de diferença entre as classes). Resultados subestimados entre 2 a 18% em relação à área estimada por dados MSS, foram encontrados por Woodwell et al. (1986) e Woodwell et al. (1987), para a região de Rondônia, utilizando a banda 3 e técnica de definição de limiar (pixel com nível de cinza maior que um desvio padrão da média da cena foi classificado como desmatamento). Estes resultados foram atribuídos à presença de nuvens ou ruído. Como proposta, os autores sugerem um fator de calibração entre dados MSS e AVHRR próximo a 1,0 para estas estimativas. Nelson e Holben (1986) também observaram que o uso de IVDN subestimou as áreas de desmatamento em Rondônia (16,39% de área estimada com dados MSS contra 13,64% com dados AVHRR).

Malingreau e Tucker (1987), em trabalho para relacionar a detecção de áreas de distúrbios, identificadas por focos de incêndio registrados na banda 3, com a quantificação de desmatamentos em Rondônia, encontraram uma boa correspondência entre IVDN e temperatura de brilho, principalmente para a estação seca. Os autores recomendam a alternativa do canal 3 AVHRR para detecção de desmatamentos, porém, não foi possível estabelecer uma forte relação entre focos de queimada e desmatamentos.

Nelson et al. (1987) procuraram quantificar o desmatamento no estado do Mato Grosso, através da correlação dos pontos de queimada, obtidos por imagem AVHRR, com a área desmatada avaliada para algumas cenas TM e MSS. Observaram um coeficiente de correlação de 0,64 entre os focos de queimada detectados pelo sensor AVHRR, e a taxa de desmatamento obtida através de imagens MSS, resultando em variações significantes na estimativa final de desmatamento. Sugeriram o uso dos focos de incêndio detectados pela banda 3 AVHRR, como um meio de estratificação entre as áreas com queimadas ativas e inativas para aperfeiçoamento de sua metodologia, objetivando uma estimativa mais precisa das mudanças da cobertura florestal.

Cabe ressaltar que, apesar da banda 3 ter sido amplamente utilizada e recomendada para estudos de detecção de desmatamentos, não há informações consistentes na literatura sobre a radiação detectada nesta faixa espectral (3.550 a 3.930 nm), que possibilite a explicação para o bom desempenho desta banda na distinção de áreas de desmatamento e floresta.

- A banda IVDN

A classificação de imagens Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (IVDN) por definição de limiares, em áreas de desmatamento lineares, não distinguiu todas as feições de desmatamentos da área estudada por Tucker et al., (1984), em Rondônia. Conforme Woodwell et al. (1986) e Woodwell et al. (1987), a imagem índice mostrou-se particularmente insensível às diferenças entre áreas de floresta e não-floresta, possivelmente devido a banda 2 não distinguir desmatamentos eficientemente e ser a banda que mais contribui para a formação do índice.

Em trabalho avaliando desmatamentos decorrentes da instalação de projetos agropecuários na região de Mato Grosso, Malingreau e Laporte (1988) observaram que os dados de IVDN apresentaram uma correlação significativa com dados termais da banda 3, ($r^2 = 0,95$ com $n = 196$ no ajuste de regressão linear) em concordância com o verificado por Malingreau e Tucker, (1987), de onde conclui-se que os dados da banda 3, assim como o índice vegetativo, possui correspondência com os parâmetros da vegetação como índice de área foliar por exemplo.

- Composição de Bandas

Segundo Nelson e Holben (1986), a classificação pelo algoritmo MAXVER da composição de bandas 1, 2 e 3 AVHRR, mostrou-se eficiente para a distinção das classes floresta/não-floresta quando comparada à classificação de imagem MSS (17,49% de área desmatada calculada com dados AVHRR, contra 16,54% para os dados MSS).

A classificação por análise de "cluster" das bandas 1, 2 e 3 do AVHRR, ao ser comparada com dados de imagem MSS/Landsat, apresentou uma exatidão média de classificação de 99% quando considerada apenas as classes de floresta e não-floresta, contra 80% de precisão obtida da classificação com outros tipos de uso do solo (Stone et al., 1989).

Nelson e Holben (1986) sugeriram que dados AVHRR de 1 km de resolução fossem utilizados como um recurso digital apropriado em estudos de desmatamentos, de grandes extensões com largura das unidades desmatadas em geral de até 2 km, como ocorre em Rondônia.

Os trabalhos realizados utilizando imagens AVHRR para análise de desmatamento propõem a utilização de um sistema de monitoramento que inclua sensores de alta resolução juntamente com os de baixa resolução, e dados de campo para determinação mais precisa das taxas de desmatamento tropical.

Malingreau e Laporte (1988) propõem que para esta metodologia os limites entre floresta e não-floresta sejam delineados por dados termais ou por índices de vegetação, provenientes de dados de baixa resolução, e a estimativa com alto nível de exatidão, detectando mudanças a cada nova imagem e indicando a natureza do crescimento secundário da vegetação, seria efetuada à partir de dados de maior resolução.

2.5.3 - RELAÇÕES ENTRE ESTIMATIVAS DE DESMATAMENTOS TROPICAIS COM DADOS AVHRR/NOAA E TM/LANDSAT

Estudando desmatamento no oeste da África e no Pará, Brasil, Stone e Schlesinger (1990), utilizaram imagens TM/Landsat e AVHRR/NOAA para conhecer as relações entre os dados provenientes destes dois sensores. As imagens foram geo-referenciadas e classificadas utilizando o algoritmo "Maxver", e então divididas em blocos de 480 Km² para a região da África e 16 Km² para o Pará. Estes blocos foram utilizados para análise de correlação e regressão. Como resultado para o oeste da África, os autores obtiveram $R^2 = 0,68$ e superestimação das áreas desmatadas. A superestimação apresentou-se mais elevada quanto menor a porcentagem de floresta. Os autores obtiveram uma diferença de 24% de subestimação de porcentagem média de floresta utilizando a classificação AVHRR. Para a região de Marabá, no Pará, obtiveram $R^2 = 0,93$, e novamente subestimação de porcentagem de

floresta contra superestimação da porcentagem de desmatamento, com erro médio de 13% na subestimação de floresta. Os autores sugerem ainda que a relação linear entre os dados AVHRR e TM é tanto mais inconsistente quanto menor a porcentagem de floresta (abaixo de 50%). Áreas com menos de 35% de floresta não foram detectadas como floresta, e o método mostrou-se apropriado para grandes regiões para o objetivo de monitoramento de áreas e taxas de redução de florestas.

Os erros associados a este trabalho (op. cit.) foram decorrentes do tamanho do pixel e da distorção geométrica inerente aos dados AVHRR. Pelo tamanho do pixel AVHRR de 1,1 km, pela dificuldade de registrar a imagem e de adquirir amostras precisas para treinamento do classificador, os autores consideram um erro mínimo de 500 m nos dados AVHRR. Acrescentam ainda que um inventário florestal global para florestas tropicais poderia ser realizado com erro esperado de 20% a 5%, utilizando-se dados AVHRR.

Santos et al. (1991) avaliaram a relação entre a área com ação antrópica estimada em uma interpretação visual de imagens TM/Landsat, composição 3, 4 e 5 (B-G-R), e aquela estimada em imagem AVHRR classificada pelo projeto UNEP-GRID, para a região da Serra do Roncador - Mato Grosso. A classificação AVHRR apresentou confusão entre as áreas de ação antrópica e aquelas cobertas por campos de várzea e/ou cerrado gramíneo-lenhoso. A análise de regressão linear entre as estimativas apresentou um coeficiente de determinação de 0,63 e erro padrão da estimativa de 8,915 ($n = 960$), e uma tendência de subestimação de áreas de ação antrópica com o uso de dados AVHRR, observada na análise dos resíduos.

Cross (1991) apresentou uma proposta de sistema automatizado para monitoramento de floresta tropical, utilizando dados AVHRR, através de técnicas de detecção de mudanças. Na metodologia proposta, o autor avaliou as relações entre as estimativas de área desmatada detectadas pelos sensores AVHRR e TM, tendo como área de estudo a região de Alta Floresta no estado do Mato Grosso. Comparou a porcentagem de área classificada como floresta através do canal 4 AVHRR, com as estimativas TM para a área, através de técnicas de imagem residual e operadores de Sobel, em 38 células de 20 km x 20 Km. Obteve coeficiente de correlação de 0,72 e inclinação da reta próxima a 45°, sugerindo pequeno desvio no uso de dados AVHRR quando comparados aos TM, e precisão média de classificação da ordem de 67% comparando os dados dos dois sensores. Para o estudo da região de Rondônia, obteve com o procedimento proposto, uma taxa de desmatamento 30% menor que aquela resultante da interpolação dos dados TM.

2.6 - SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA EM ESTUDOS DE DESMATAMENTO

Cross (1990), utilizando dados AVHRR, estudou desmatamentos em Rondônia, organizando um conjunto de dados armazenados em SGI para ser utilizado no monitoramento da região. Avaliou a precisão do classificador iterativo para IVDN e banda 3, o método de mínimas distâncias e o classificador "MAXVER". Ao comparar os resultados das classificações com o mapa de desmatamento pré-existente na forma digital, o autor verificou que o algoritmo "MAXVER" apresentou melhor desempenho. Este então foi utilizado na identificação das áreas de floresta e não-floresta. Comparando a classificação AVHRR com a TM, verificou que o mapeamento AVHRR distinguiu com sucesso o

padrão de espinha de peixe mas superestimou a área desmatada na cena-teste em 20%.

O mesmo autor realizou testes da classificação AVHRR para duas diferentes áreas no Pará, e verificou que a porcentagem de pixels classificados corretamente foi de 94% para a região de Altamira (desmatamento linear ao longo da Transamazônica) e de 88% na região sul, onde ocorrem os grandes projetos agropecuários. A confusão de classificação foi atribuída a áreas de regeneração que ocasionam pixels misturados.

Estes testes mostraram que os dados AVHRR são comparáveis aos TM, apesar da resolução, apresentando erro de classificação na presença de pixels mistos, e que dados AVHRR são confiáveis para manipulação em Sistema de Informação Geográfica.

Sader et al. (1990), em uma revisão teórica sobre a aplicação do sensoriamento remoto em estudos ambientais, também sugerem o uso de dados AVHRR, conjuntamente aos TM, e suas manipulações em SIG, para monitoramento das alterações em florestas tropicais.

Skole et al. (1990) também apresentaram estimativas de taxas de desmatamento da região Amazônica para anos da década de 1970, utilizando apenas dados TM em SGI. Foram apresentados os resultados da tentativa de desenvolvimento de uma base de dados digitais em SGI para desmatamento no Brasil, tendo como plano inicial básico os mapas do INPE/IBDF para 1979 (Tardin et al., 1980). Ao comparar as estimativas com as apresentadas por Tardin et al (1980), o autor observou-se estimativa 24% maior para o ano de 1975 e 33% para 1978, sem que estas diferenças fossem explicadas.

O INPE para armazenar os dados de desmatamento referentes aos anos de 1988 a 1991, numa forma geo-referenciada, desenvolveu o Sistema de Informação da Amazônia. Este sistema equivale a um sistema geográfico de informações que integra áreas de desmatamento a outros dados de diferentes naturezas, para estudos de alteração na floresta amazônica, e seus impactos. São utilizadas apenas imagens MSS (bandas 5 e 7) e TM/Landsat (composição 3, 4 e 5), interpretadas visualmente e digitalizadas para gerar mapas na escala de 1:250.000. Estes mapas estão sendo utilizados para estimativas de taxa de desmatamento, avaliação de seu impacto nas diferentes formações florestais e verificação de sua distribuição por município (Alves et al., 1992).

Estes trabalhos demonstraram a possibilidade do uso de imagens AVHRR e TM/Landsat em sistemas de informações geográficas e a compatibilidade destes dados para estudos de desmatamentos em florestas tropicais.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a área de estudo, apresenta os dados TM e AVHRR utilizados e os procedimentos metodológicos, como processamento digital de imagens, sobreposição de dados e análise estatística, utilizados para analisar as relações entre as áreas de desmatamento obtidas pelos sensores TM e AVHRR.

3.1 - DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

As duas áreas de estudo correspondem às regiões da Serra do Roncador e de São José do Xingu, no norte do Mato Grosso. Estas áreas foram selecionadas de modo a representarem tipicamente o padrão de desmatamento causado pela instalação de projetos agropecuários, em geral de grande escala, em regiões de floresta ombrófila e de transição.

As áreas selecionadas encontram-se indicadas pelas localizações das cartas topográficas hachuradas (MIR 322 e MIR 301 - IBGE, 1986), ilustradas na Figura 3.1.

A identificação da vegetação original nestas áreas baseou-se no Mapa de Vegetação do Brasil na escala 1:5.000.000 do IBGE (1988). O reconhecimento dos padrões espaciais foi feito a partir das imagens TM/Landsat na escala 1:250.000, do ano de 1989, composição colorida em papel fotográfico, utilizadas no Atlas de Desmatamento da Amazônia (INPE, 1989).

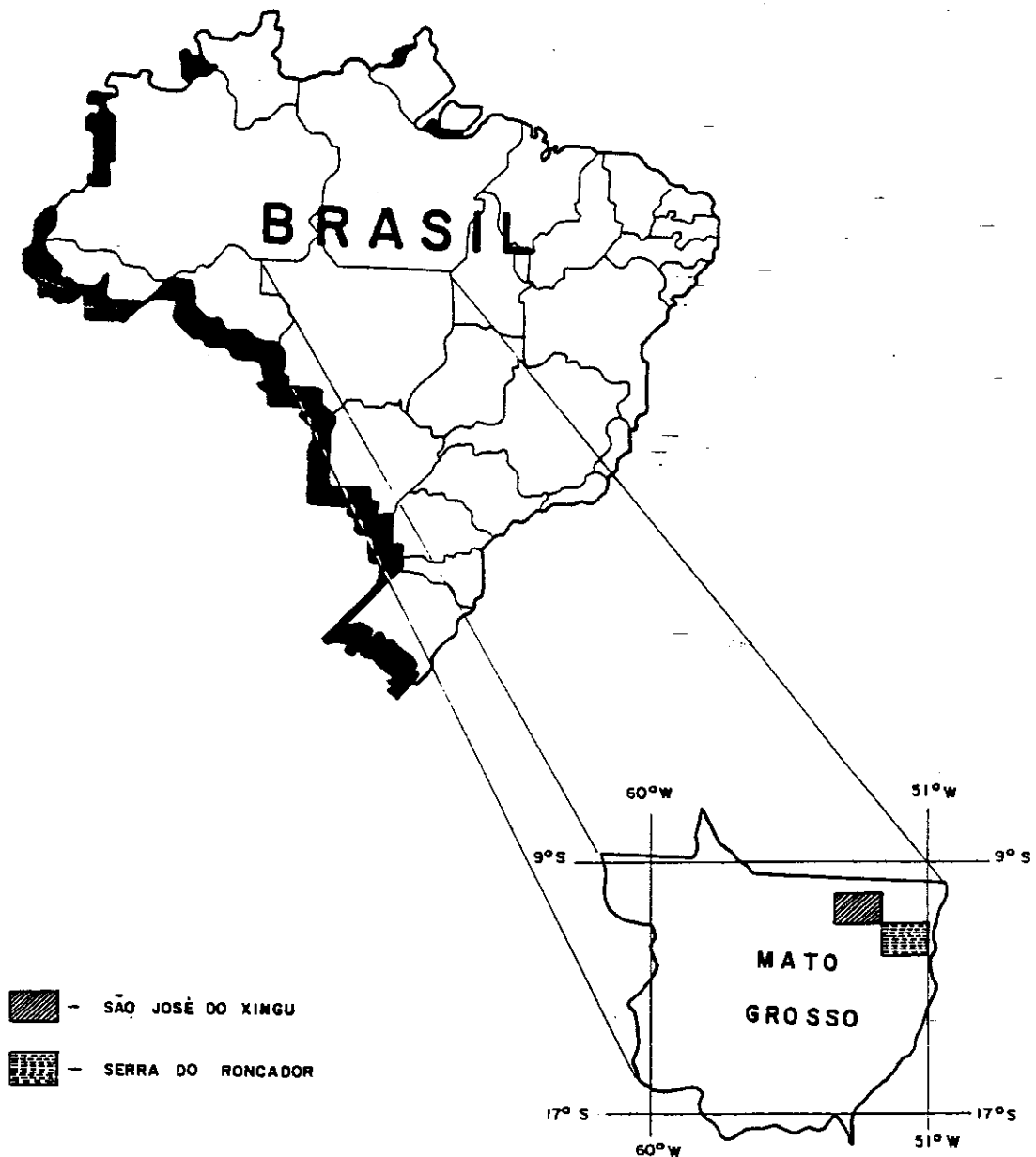


Fig. 3.1 - Localização das áreas de estudo.

A região da Serra do Roncador foi utilizada para definição de uma metodologia de processamento e classificação de imagens AVHRR eficiente na detecção de áreas desmatadas, e para a comparação dos resultados das

estimativas de área entre dados TM e AVHRR, definindo possíveis relações entre os dois tipos de dados.

A área de São José do Xingu serviu para testar os resultados obtidos na primeira área, e foi utilizada também para avaliar as relações entre os dados TM e AVHRR propostas. Seguem-se as descrições destas áreas, segundo o relatório do Projeto Radam-Brasil (1981).

3.1.1 - SERRA DO RONCADOR

A região referente à Serra do Roncador, no nordeste de Mato Grosso situa-se entre 11°00' e 12°00' de latitude sul e 51°00' e 52°30' de longitude oeste. A Serra do Roncador separa o Planalto dos Parecis a oeste, com relevos de topos aplanados, da Depressão do Araguaia a leste. No extremo oeste da região encontra-se a Planície do Bananal.

Esta região, segundo o relatório do Projeto Radam-Brasil (1981) é caracterizada por diferentes regiões ecológicas que condicionam a disputa de ocupação do espaço pelas diferentes formações vegetais, causando a ocorrência de um gradiente da vegetação. Encontram-se as regiões fitoecológicas de contato entre floresta ombrófila e floresta estacional, entre floresta ombrófila e savana, savana parque, savana arbórea-aberta, vegetação aluvial e áreas de atividades agrícolas.

No contato entre floresta ombrófila e estacional ocorrem agrupamentos de árvores caducifólias com perda total ou parcial das folhas. A formação decídua pode apresentar lianas cobrindo parcialmente as copas. Caracteriza-se também por estrato superior e submata densos. São áreas com desmatamentos constantes para a

criação de bovinos, e muitas são abandonadas propiciando o desenvolvimento de vegetação secundária.

No contato entre savana e floresta ombrófila predominam, de um modo geral, árvores com altura de 15 a 20m, de fustes delgados, e baixo volume por unidade de área.

A região de savana arbórea-aberta é uma formação campestre com pequenas árvores típicas, raquíticas ou degradadas pelo fogo anual. A periodicidade do fogo é característica desta formação conhecida como campo-cerrado.

A savana-parque, por sua vez é uma formação essencialmente campestre de origem natural ou antrópica.

Os terrenos aluviais promovem o estabelecimento de formações pioneiras, arbustivas, nas áreas de influência fluvial. Ocorrem em áreas periodicamente inundáveis e apresentam extensões de gramíneas, intercaladas por árvores e palmeiras.

As atividades agrícolas referem-se à implantação de fazendas com atividade principal de formação de pastagens para a criação de gado. As demais atividades agrícolas, em geral, apresentam baixo nível tecnológico, caracterizados por plantio convencional de arroz, milho e mandioca. Encontra-se, nesta região, um padrão de desmatamento de grandes áreas independentes, de 1.000 a 10.000 ha, e com limites regulares e lineares, em geral, representando áreas onde os desmatamentos advêm de atividades em projetos agropecuários (Projeto Radam-Brasil, 1981).

3.1.2 - SÃO JOSÉ DO XINGU

A região referente à São José do Xingu situa-se entre 10°00' e 11°00' de latitude sul, e 52°30' e 54° 00' de longitude oeste. Esta região encontra-se principalmente no Planalto dos Parecis; ao norte está a Depressão Periférica do Sul do Pará e regiões de Planície fluvial ao longo do rio Xingu, periódica ou permanentemente alagada.

Esta região localiza-se no domínio das seguintes regiões fitoecológicas: floresta ombrófila densa submontana, floresta ombrófila aberta submontana, contato entre floresta ombrófila e savana, entre floresta estacional e savana, entre floresta ombrófila e estacional, áreas de vegetação aluvial e áreas de vegetação secundária e atividades agrícolas em área de floresta ombrófila aberta.

A floresta ombrófila densa caracteriza-se por árvores de folhas perenes, com brotos foliares sem proteção contra períodos de estiagem. A floresta ombrófila aberta por sua vez, caracteriza-se por apresentar grandes árvores espaçadas, as vezes cobertas por lianas, e as espécies arbóreas características são as mesmas encontradas na floresta densa. As áreas de formação pioneira aluvial possuem fisionomia dominante arbustiva, intercaladas por árvores de pequeno porte e palmeiras.

No contato entre floresta estacional e savana estas duas regiões se interpenetram, a floresta possui porte baixo, com árvores de diâmetros finos, apresentando alguns indivíduos emergentes. A descrição das outras regiões de contato correspondem às apresentadas para a região da Serra do Roncador.

O clima das duas áreas de estudo é caracterizado por temperaturas médias elevadas entre 22 e 25°C, com temperatura mínima do mês mais frio de 18°C, sendo os meses de primavera-verão os mais quentes, pois coincidem com o período mais chuvoso. Observa-se isoterminia (amplitude térmica pouco significativa), com máxima de 20°C de amplitude no mês de julho; estação seca de 2 meses; e precipitação total média anual de 2500 mm, aproximadamente. Assim sendo, o clima da região é classificado genericamente, pelo Sistema de Koppen (1948) como Am: quente e úmido, com curta estação seca.

3.2 - MATERIAIS

3.2.1 - AQUISIÇÃO DE DADOS

Optou-se por utilizar dados de 1989 devido à disponibilidade de imagens TM/Landsat do Atlas de Desmatamento da Amazônia (INPE, 1989), referentes a este ano, e das imagens AVHRR do arquivo de projeto SEQUE de monitoramento de queimadas do INPE, também do mesmo ano. Selecionou-se áreas de estudo que possuísem imagens TM e AVHRR sem cobertura de nuvens, e imagem AVHRR com órbita relativamente centrada na área, além de uma data próxima à passagem do satélite Landsat-5. O arquivo do projeto SEQUE não dispõe das bandas 4 e 5 do sensor AVHRR para o ano de 1989. Desta forma, apenas as bandas 1, 2, 3 e a banda de índice de vegetação gerada posteriormente foram utilizadas neste estudo.

3.2.1.1 - DADOS TM/LANDSAT

Foram utilizadas imagens TM/LANDSAT, composição colorida das bandas 3 (R), 4 (G), 5 (B) em papel, escala 1:250.000, do Atlas de Desmatamento da

Amazônia (INPE, 1989). O perímetro da delimitação da área de estudo equivale aos limites das cartas topográficas de cada região. A Tabela 3.1 apresenta as cartas topográficas, suas localizações geográficas, e imagens TM com suas órbita-ponto e datas respectivas.

TABELA 3.1-- CARTAS TOPOGRÁFICAS E IMAGENS TM/LANDSAT
REFERENTES ÀS ÁREAS DE ESTUDO

CARTAS TOPOGRÁFICAS			IMAGENS TM	
NOME				
IDENTIFICAÇÃO	LAT	LONG	ÓRBITA-PONTO	DATA
SERRA DO RONCADOR	11°00'	51°00'	224/68	02-09-89
MIR 322	12°00'	52°30'		
SÃO JOSÉ DO XINGU	10°00'	52°30'	225/67	08-08-89
MIR 301	11°00'	54°00'		

3.2.1.2 - DADOS AVHRR/NOAA

Na falta de "quick-look" para seleção de imagens sem cobertura de nuvens, mais de 40 fitas CCT referentes às passagens de 1989, foram lidas uma a uma em unidade de fita, a partir de uma pré-seleção de datas pela observação de imagens do satélite GOES.

Foi utilizada a imagem do sensor AVHRR, do satélite NOAA-11, de 17-09-1989, órbita 5053 (ascendente), com longitude de cruzamento do Equador no meridiano de 57°00' oeste. Apesar deste meridiano estar posicionado a oeste da área de estudo a inclinação da órbita de 98.944 graus, permitiu que a área desejada correspondesse a região central na imagem. Esta imagem foi utilizada para as duas regiões de estudo, visto que as duas regiões encontram-se

na porção central da imagem, não apresentando cobertura de nuvens, e a data de aquisição da imagem ter sido próxima às passagens TM (após 15 e 38 dias). Esta imagem AVHRR foi utilizada para gerar duas imagens referentes às respectivas áreas de estudo.

3.2.2 - INFRA-ESTRUTURA OPERACIONAL

São apresentados a seguir os equipamentos utilizados para o suporte deste trabalho.

Para leitura e cópia das fitas "Computer Compatible Tape" (CCT) NOAA e Landsat utilizou-se a unidade de fita 1/2 polegada - COMPART.

Para processamento de imagens AVHRR utilizaram-se softwares desenvolvidos para ambientes PC, apresentados nesta metodologia, e a classificação destas imagens foi feita no SITIM-150 (Sistema Interativo de Tratamento de Imagens). Para a imagem TM no formato digital, todo processamento foi executado no SITIM-150. Utilizou-se ainda o Sistema Geográfico de Informações - SGI desenvolvido pelo INPE e Engespço para integração dos dados provenientes dos dois sensores.

O SITIM-150 é um sistema destinado à extração de informações a partir de dados de sensoriamento remoto. É constituído basicamente por um microcomputador 286, seus periféricos (disco rígido - 60 "megabytes", disco flexível e terminal de vídeo alfanumérico), um terminal gráfico ou unidade visualizadora de imagens UVI-150 (com 4 planos), monitor colorido e impressora (Engespço, 1988). O SGI é um sistema complementar ao SITIM, disponível no mesmo ambiente, que permite adquirir, armazenar, combinar, analisar e recuperar informações codificadas espacialmente

em um banco de dados geográfico. A configuração básica é a mesma do SITIM, sendo acrescido de uma mesa digitalizadora e uma plotadora (Engespaço, 1990).

3.3 - MÉTODOS

O procedimento metodológico, descrito nos itens que seguem neste capítulo pode ser visualizado esquematicamente na Figura 3.2.

A área de estudo referente à Serra do Roncador foi utilizada para desenvolver uma metodologia - experimental de processamento de imagem AVHRR, que proporcionasse a classificação coerente de áreas de desmatamento e floresta principalmente. A imagem AVHRR desta área foi objeto dos seguintes procedimentos: pré-processamento, análise de histogramas e covariância entre bandas, análise da estatística das classes, classificação digital, seleção das melhores combinações de bandas, integração dos dados (realizada no SGI), tabulação cruzada e análise estatística (intervalo de confiança para média, correlação, regressão, análise de resíduos e análise de "outliers").

A área referente a São José do Xingu destinou-se à aplicação da metodologia desenvolvida para a região do Roncador, avaliando assim a validade dos resultados. Esta área de estudo foi objeto dos seguintes procedimentos: pré-processamento, classificação digital, integração dos dados, análise estatística (intervalo de confiança para média, correlação, regressão, aplicação do modelo obtido para a região do Roncador).

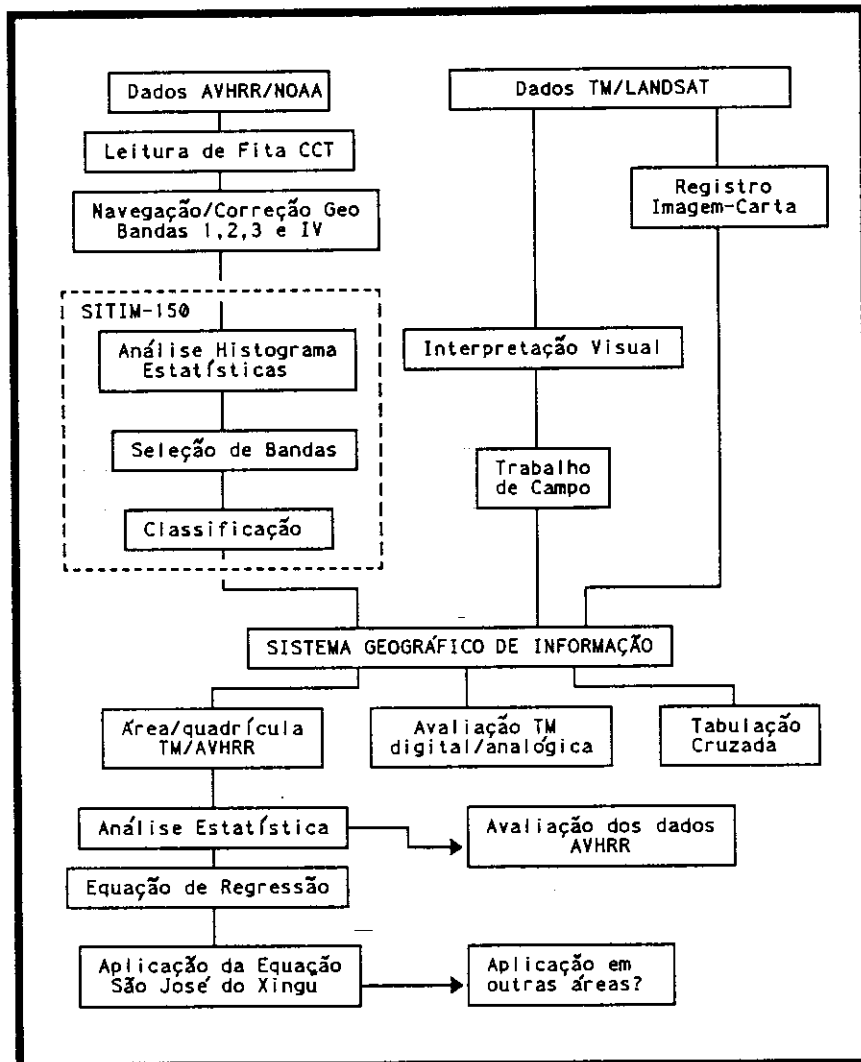


Fig. 3.2 - Procedimento metodológico utilizado.

Quanto aos dados obtidos a partir de imagens TM/Landsat, as duas áreas de estudo foram submetidas ao mesmo procedimento metodológico, exceto o item avaliação da geometria das imagens TM referiu-se apenas à área do Roncador. Os procedimentos metodológicos citados são descritos a seguir.

3.3.1 - INTERPRETAÇÃO VISUAL DE IMAGENS TM/LANDSAT

As imagens correspondentes às duas áreas de estudo foram classificadas, através de interpretação visual, de modo a definir os limites de classes com os seguintes rótulos: "floresta", "floresta alterada", "desmatamento", "queimada", "floresta secundária", "vegetação pioneira", "cerrado" e "floresta ciliar".

As áreas consideradas pertencentes à classe "floresta" foram identificadas na imagem TM (resolução de 30 m) como regiões isentas de qualquer ação antrópica. Na composição utilizada, foi discriminada através da cor verde escuro e pela textura granular. Áreas de floresta detectadas na região de ocorrência de cerrado, foram identificadas e incorporadas na classe floresta, sem distinção.

A classe "floresta alterada" compreende áreas de floresta que embora tenham sofrido alguma atividade antrópica, como por exemplo desbaste seletivo, ou compõem pequenas ilhas de floresta em regiões de ocupação, ainda conservam na imagem estrutura e fisionomia de caráter florestal. Esta classe é detectada na imagem por apresentar um padrão semelhante a floresta, porém com a ocorrência de pequenos pontos de cor rosa amarelada (menores de 2 mm na escala da imagem, ou seja, 500 m no terreno), caracterizando pequenas clareiras, ou por ilhas de floresta (área de floresta de mais de 5 mm de diâmetro, na escala da imagem) em áreas ocupadas intensivamente.

A classe denominada "desmatamento" caracteriza-se por áreas pertencentes originalmente ao domínio florestal que encontram-se submetidas a diferentes níveis de ações de alteração antrópica e integradas no

sistema produtivo da região. Agricultura e pecuária são as atividades preponderantes nestas áreas, distintas na imagem pela cor rosa, rosa escuro, devido principalmente à contribuição de refletância do solo, apresentando geralmente limites regulares e formas geométricas (áreas de dimensões inferiores a 9 mm^2 na escala da imagem, 0.56 km^2 no terreno, não foram discriminadas).

As áreas identificadas com o rótulo "queimada", correspondem àquelas que sofreram corte da cobertura florestal, com uso posterior do fogo como prática de limpeza de terreno. Estas áreas foram observadas na imagem com cor roxo-azulada na composição colorida utilizada (3R, 4G e 5B - banda 3 no canal vermelho, banda 4 no canal verde e banda 5 no canal azul), com formas irregulares, contíguas ou não às áreas de desmatamento.

Áreas no domínio florestal, que notadamente tiveram sua cobertura original retirada, e que encontram-se em estágio de sucessão mais avançado na constituição da flora, ou seja, vegetação de característica arbustiva e arbórea-arbustiva, com menor densidade e altura dos indivíduos que na floresta primária, foram denominadas "floresta secundária". Na imagem, é distinta pela cor verde, menos intenso, tendendo para aquele observado na floresta, e pela textura lisa tendendo à rugosa.

A classe denominada "vegetação pioneira" abrange porções que foram desmatadas e que se encontram em estágio inicial no processo de regeneração da vegetação natural, como por exemplo os pastos mal implantados, ou que apresentam de 10 a 30% da área compreendida por vegetação arbórea dispersa. É identificada pela cor marrom-escuro, heterogêneo e textura rugosa no caso de predomínio de pastagens mal implantadas, e por áreas de tons mais

esverdeados, de limite pouco preciso dentro das áreas desmatadas, resultante de um adensamento localizado da vegetação arbórea/arbustiva.

As ocorrências de cerrado nas imagens foram identificadas a partir das indicações do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 1988) e do mapeamento do Projeto Radam-Brasil (1981). Na imagem, detecta-se através da cor rosa homogênea, formas irregulares, associadas à topografia, descontínuas, e em zonas distintas de ocorrência.

A classe intitulada "floresta ciliar" compreende as áreas de alagamento dos rios, sugeridas nas imagens pela vegetação de galeria, distinta da vegetação circundante por apresentar coloração verde escura, textura mais lisa e homogênea que as regiões de floresta, e delinear o padrão de drenagem.

Nos casos onde ocorreram áreas que poderiam ser classificadas como mais de uma classe, optou-se pela classe preponderante. Por exemplo, áreas ocupadas por pastagens ou outro uso que caracterizam ocupação humana em região de cerrado, foram classificadas como cerrado; áreas de desmatamento que apresentavam queimadas, foram classificadas apenas como queimada.

3.3.2 - VERIFICAÇÃO DE CAMPO

As dificuldades para classificação de algumas áreas, no que diz respeito às classes de vegetação pioneira e floresta, demandaram uma verificação, mesmo que não minuciosa, da área de estudo.

Com o sobrevôo da Operação Queimada de 1991 (4 a 10 de setembro), surgiu a oportunidade de observar a

área de estudo. Esta verificação de campo veio a complementar as informações necessárias, através de documentação fotográfica, das áreas de dúvida, facilitando também a classificação das imagens AVHRR pelo reconhecimento dos padrões de cada classe, definidas a partir da interpretação visual das imagens TM.

O trabalho de campo foi executado no dia 7 de setembro de 1991, final do "inverno" na região norte, época seca, durante o período em que se concentram as queimadas. A emissão constante de fumaça e gases das queimadas proporcionaram uma condição precária de visibilidade, comprometendo a avaliação eficiente das áreas previstas. Os dados de campo (apenas sobrevôo) apresentados são referentes apenas à região da Serra do Roncador.

3.3.3 - AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE IMAGEM TM/LANDSAT

3.3.3.1 - IMAGEM GERADA A PARTIR DE INTERPRETAÇÃO VISUAL

O procedimento de digitalização dos dados pode incorrer em erros na definição de contornos das áreas de desmatamento, floresta, e outras classes mapeadas, transferidos para o SGI. Há inicialmente a imprecisão do próprio sistema de digitalização, ou seja, a relação entre o "mouse", a mesa e o microcomputador. Outra fonte de erro é a possibilidade do material do qual é constituído o "overlay" ser sensível às variações microclimáticas e assim, apresentar variações diferenciadas vertical e horizontalmente, deformando as figuras definidas por cada classe. Tais imprecisões são sistêmicas e dificilmente quantificadas.

Uma outra fonte de erro na digitalização manual de dados é a calibração da mesa e o ajuste que o

sistema executa para que o "overlay" seja digitalizado com uma projeção cartográfica definida. Para a calibração da mesa são necessários quatro pontos de controle que referenciam coordenadas da mesa digitalizadora às coordenadas de latitude e longitude dos dados. Estes pontos foram adquiridos em uma carta topográfica de modo que estivessem bem distribuídos pela área de estudo, e que fossem facilmente detectados na imagem TM/Landsat correspondente.

A imagem TM utilizada para a interpretação visual, quando processada no laboratório de Cachoeira Paulista, não foi corrigida para uma projeção cartográfica definida, ou seja, não possui informação de pontos de controle para seu refinamento de correção geométrica. No SGI, todo e qualquer dado deve estar georeferenciado, daí a necessidade de pontos de controle para, além de calibrar a mesa com o sistema, relacionar as coordenadas x, y da mesa com coordenadas de latitude e longitude de cada ponto numa projeção cartográfica definida.

De modo a avaliar possíveis imprecisões decorrentes deste procedimento, realizou-se uma verificação simples das diferenças encontradas entre o mapa digitalizado e a carta topográfica, através da função "calcular coordenadas" do SGI, em termos de coordenadas planas, para X (longitude) e Y (latitude), possibilitando a quantificação direta dos erros em metros.

3.3.3.2 - IMAGEM DIGITAL REGISTRADA

Este procedimento avaliou a precisão de posicionamento presente em uma imagem digital, para poder compara-la àquela presente na imagem TM resultante da interpretação visual e digitalização.

Para que a geometria da imagem TM referente a Serra do Roncador fosse corrigida, esta foi registrada no ambiente do SITIM-150 (Engespaço, 1988), com a carta topográfica da região (MIR 322), ambas na escala 1:250.000.

A imagem registrada foi transportada para o SGI, através da função "Importar Imagens" do SGI, após o que a posição de pontos identificáveis na imagem TM foi comparada com sua posição na carta topográfica utilizada para o registro, através da opção "calcular coordenadas". Quantificou-se os deslocamentos nos eixos X e Y (em metros) apresentados entre a imagem registrada e a carta.

3.3.4 - PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS AVHRR/NOAA

A imagem AVHRR/NOAA foi submetida inicialmente à um pré-processamento, com objetivo de efetuar a navegação e correção geométrica das imagens.

1) Navegação

A navegação, procedimento que transforma matematicamente o sistema de referência do satélite (linha e coluna) para o sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude), proporcionando a localização das áreas de estudo, foi feita através do algoritmo AJUSTE_A, desenvolvido por Figueiredo (1990) e modificado por Setzer et al. (in press). Este algoritmo não altera a estrutura de "pixels" da imagem e possui precisão de localização de 1 pixel AVHRR, segundo Setzer e Pereira (1989), modificando apenas o arquivo de parâmetros orbitais.

Para a aquisição das coordenadas geográficas dos pontos de controle na navegação da imagem foi utilizada a Carta Aeronáutica Mundial (IBGE, 1976), Cachimbo - WAC

3069, na escala de 1:1.000.000, na projeção Cônica Conforme de Lambert. As coordenadas geodésicas foram adquiridas no SGI, através da mesa digitalizadora, e então transformadas em graus decimais para serem utilizadas no algoritmo de navegação.

2) Correção Geométrica

Para a correção geométrica da imagem fez-se necessário a adaptação de um algoritmo pré-existente, desenvolvido por Figueiredo (1990). Este algoritmo gera uma imagem de índice de vegetação (IVDN), com resolução espacial de 5 km, na projeção cilíndrica eqüidistante, à partir de imagens AVHRR. A modificação foi feita de modo a produzir não apenas imagens de índice de vegetação como também bandas isoladamente, e com resolução espacial de 2 km. A modificação da resolução espacial de 5 para 2 km e não para 1 km, é justificada pelo limite de precisão da navegação do algoritmo utilizado ser de 1 pixel. A medida que se aproxima das bordas da imagem, a resolução do pixel vai sendo progressivamente degradada, apresentando mais de 1 km, ou até mesmo cerca de 3 km de resolução. Desta forma, vários pixels na imagem de saída, corrigida geometricamente, seriam resultantes da reprodução de um único pixel da imagem original, o que estaria comprometendo a qualidade da imagem.

A imagem corrigida para os parâmetros de atitude e efemérides do satélite, pela navegação, foi transposta, através deste algoritmo modificado, para a projeção cilíndrica eqüidistante transformando sua geometria interna condizente aos padrões cartográficos, e sua resolução convertida para 2 km, dando origem a duas imagens contendo as sub-cenas referentes às duas áreas de estudo.

3) Imagem Índice de Vegetação

Conforme descrito acima, o programa de correção geométrica gera, além das bandas 1, 2 e 3 corrigidas, a banda do índice de vegetação. Esta banda é resultante de uma combinação entre as bandas 1 e 2, sendo o índice de vegetação utilizado, o de diferença normalizada, (descrito na fundamentação teórica) dado por:

$$IVDN = \frac{(B1 - B2)}{(B1 + B2)}$$

onde: B1 = nível de cinza na banda 1

B2 = nível de cinza na banda 2

A banda de índice de vegetação de diferença normalizada foi abreviada neste trabalho como "banda IV".

3.3.5 - ANÁLISE DE HISTOGRAMAS E CÁLCULO DAS ESTATÍSTICAS

A imagem corrigida pelo procedimento acima, referente à região da Serra do Roncador, foi utilizada inicialmente para estudo de suas características espectrais e distinção de classes.

Utilizou-se as técnicas de análise de histograma e de cálculo das estatísticas, oferecidas pelo SITIM-150 ("Cálculo de estatísticas") para avaliar o histograma de cada banda e a correlação entre elas. A análise dos histogramas possibilita o conhecimento da distribuição das classes quanto a frequência de pixels ao longo dos valores de nível de cinza, ou seja, constitui um aprendizado sobre as classes da cena facilitando a classificação digital posterior.

Visando facilitar a classificação da imagem, procedeu-se ainda um estudo das classes presentes na imagem quanto a suas média, variância e intervalo de níveis de cinza.

Para estudo das bandas AVHRR procedeu-se a análise de correlação entre elas. Na matriz de covariância fornecida pelo cálculo de estatísticas do SITIM, os valores da diagonal principal correspondem à variância da banda, e os outros valores da matriz correspondem à covariância entre as bandas da linha e coluna referente ao valor.

Segundo Costa Neto, (1977) a covariância entre duas variáveis é uma medida do grau e intensidade da correlação linear entre elas e é dada por:

$$\text{cov}(x, y) = S_{xy} = \frac{(x_i - x_m)(y_i - y_m)}{n-1}$$

onde: cov = covariância de x e y

x_i = valor de x em i

x_m = média de x

y_i = valor de y em i

y_m = média de y

n = número de amostra

De posse destes dados de covariância entre bandas, e da variância, e do desvio padrão de cada banda, calculou-se o coeficiente de correlação linear de Pearson, considerando a seguinte relação entre estes parâmetros:

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{S_x \cdot S_y}$$

onde: r = coef. de correlação de Pearson
 $\text{cov}(x, y)$ = covariância entre x e y
 S_x = desvio padrão de x
 S_y = desvio padrão de y
 x e y = duas bandas AVHRR

A análise de correlação entre as bandas indica quais bandas devem ser combinadas, de modo a evitar redundância de informação. Uma composição com bandas pouco correlacionadas fornece informações distintas provenientes de cada banda, favorecendo a distinção de classes, o que não seria igualmente obtido por uma composição de bandas bem correlacionadas.

3.3.6 - CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS AVHRR/NOAA

Para determinar as combinações de banda que seriam utilizadas para a classificação da imagem AVHRR, utilizando as bandas 1, 2, 3 e IV (índice de vegetação de diferença normalizada), utilizou-se a opção "seleção de atributos" na classificação "Maxver" fornecidas pelo SITIM -150.

Para a definição dos atributos (bandas) a serem utilizadas na classificação, faz-se a escolha do conjunto de atributos que maximiza a distância J-M mínima ou média entre as classes mais próximas, diminuindo assim a probabilidade de erro na classificação. A distância J-M (Jeffreys-Matusita Distance), define a distância entre duas classes através da função de densidade Gaussiana. (Mascarenhas e Velasco, 1984).

Utilizou-se o algoritmo de Máxima Verossimilhança ("Maxver"), que segundo Cross (1990) é o procedimento que melhor classifica áreas desmatadas em imagens AVHRR para as combinações de bandas sugeridas na seleção de atributos. Aplicou-se também este algoritmo para a combinação das quatro bandas disponíveis, mesmo não dispondo do resultado da seleção de atributos para esta combinação.

O treinamento automático supervisionado considera o conhecimento prévio do operador quanto às classes presentes na região a ser classificada. A interpretação visual de imagens TM/Landsat proporcionou este conhecimento prévio. Contudo, se por um lado a distinção visual de classes considera o contexto (vizinhança, forma, distribuição de padrões) que não são distintos numa classificação digital, por outro lado, não é tão sensível às variações espectrais das classes, distintas na classificação digital.

Para otimizar o classificador "Maxver" em imagens de baixa resolução, ou seja, diminuir a confusão e aumentar o desempenho médio, são necessários alguns cuidados. A aquisição de amostra deve ser criteriosa, sugerindo-se até a aquisição pixel a pixel de muitas amostras (n maior ou igual a 30) para a definição das distribuições de probabilidade de cada classe. A inclusão errônea de um pixel, que representa uma área heterogênea, compreendida visualmente como pertencente a classe mas não espectralmente, promove uma distribuição de probabilidade inadequada que terá uma variância muito grande representada pela curva gaussiana muito extensa (Richards, 1986).

A classificação por fatiamento de níveis de cinza foi realizada para verificar o desempenho desta classificação em cada uma das bandas isoladamente e

compará-las às respectivas classificações provenientes do algoritmo "Maxver".

3.3.7 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS NO SGI

Os dados AVHRR, referentes a imagens classificadas digitalmente, assim como os dados TM, provenientes da interpretação visual de imagens, foram transportados para o sistema geográfico de informações - SGI. As operações realizadas no SGI tiveram como objetivo viabilizar a comparação qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos a partir das classificações de imagens AVHRR e TM.

Definiu-se para cada área de estudo dois "projetos": um com os dados TM na escala de 1:250.000 e projeção UTM (Universal Transverse de Mercator), conforme dados da carta topográfica utilizada para correção da interpretação visual; e outro projeto para os dados AVHRR, na escala de 1:2.000.000, na projeção cilíndrica eqüidistante, contendo como planos de informação ("PIs") os mapas temáticos resultantes da classificação automática das imagens AVHRR, de 2 km de resolução.

As atividades realizadas no SGI encontram-se esquematizadas na Figura 3.3.

a) Entrada de dados

A entrada dos dados TM no SGI foi executada através da opção de "digitalizar arcos", utilizando-se a mesa digitalizadora. A entrada de dados da interpretação, via digitalização manual, determina o ajuste da interpretação da imagem para a projeção da carta (UTM), através da função de "calibração da mesa" no SGI.

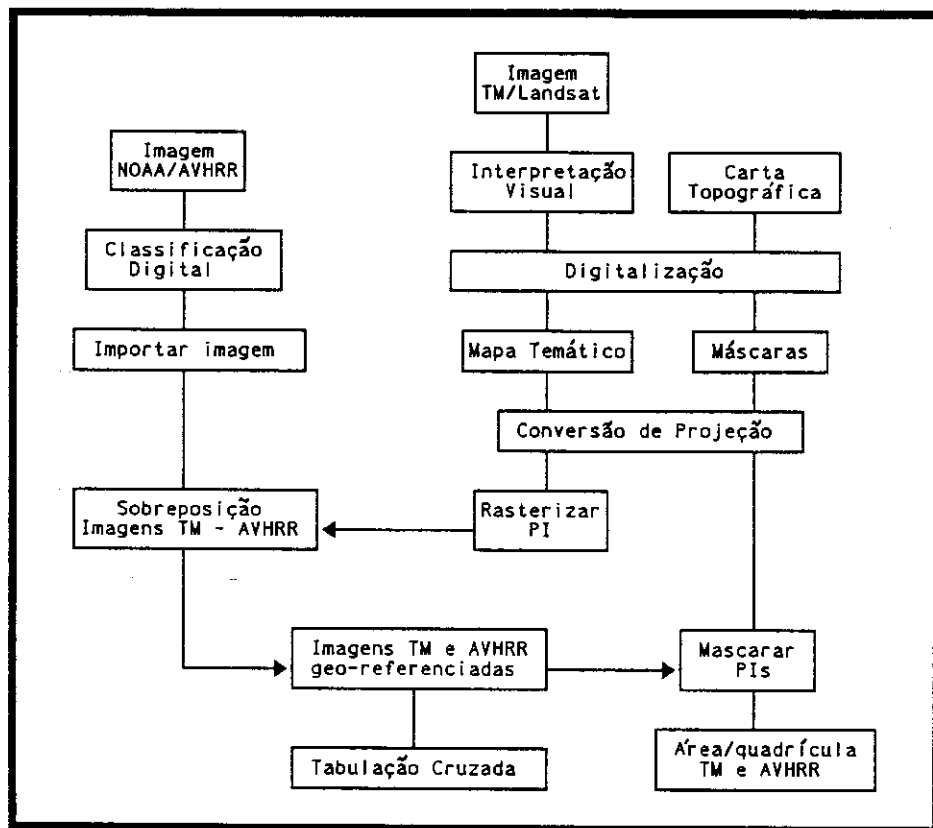


Fig. 3.3 - Atividades realizadas no SGI.

Após a digitalização, estes dados são editados de modo a constituírem polígonos, com suas relações de vizinhança e classes definidas. As funções de edição compreendem: "ajuste de linhas", que define as intersecções entre os arcos através de seus nós; "inserção de centróides", que tem por objetivo associar ao polígono a classe definida na interpretação visual; e "poligonalização" que define o polígono, e as relações de vizinhança entre os polígonos (topologia). Os dados assim editados podem ser manipulados pelo sistema.

Os dados AVHRR tiveram sua entrada no SGI através da opção "entrada de imagens", onde os dados do pré-processamento, presentes no arquivo de referências da imagem, são decodificados e o sistema entende o geo-referenciamento da imagem.

b) Integração dos dados

Dados TM e AVHRR foram comparados em um único projeto no SGI. Desta forma, os arquivos de linhas, centróides e polígonos dos planos de informação presentes no projeto TM foram convertidos para o projeto AVHRR, através da função "conversão de projeções", onde então, foram realizadas as manipulações posteriores.

Esta conversão foi feita de modo a modificar a projeção dos dados TM (UTM) para a projeção dos dados AVHRR (Cilíndrica Equidistante), devido a limitação da projeção UTM não ser adequada para dados em escala muito pequenas, e pela limitação do SGI de apenas converter projeções de dados no formato vetorial.

As classificações AVHRR foram importadas para o SGI, de modo a verificar a sobreposição das imagens TM digitalizada e AVHRR digital-classificada.

A imagem TM foi considerada o geo-referenciamento preciso dos dados, e as imagens AVHRR classificadas foram posicionadas de modo a coincidir suas feições com a TM. Este procedimento consistiu inicialmente em obter as diferenças de posicionamento (em coordenadas planas de X e Y) de uma feição discernível nos dados TM e AVHRR, através da função "calcular coordenadas". A partir destas diferenças, o arquivo de referencial da imagem NOAA, foi construído iterativamente, através do programa "escref"

(Ii, 1988), subtraindo-se as diferenças nas coordenadas da imagem. Este procedimento foi executado até que a imagem AVHRR tivesse suas feições localizadas coincidentemente às TM.

c) Obtenção de área das classes dos PIs

O plano com as informações TM foi convertido em uma imagem de resolução de 90 metros, através da função "converter vetor-varredura" no SGI, para possibilitar a aplicação das máscaras e o cálculo de área de suas classes. A resolução foi escolhida de modo a otimizar os parâmetros de precisão desejada e de tempo computacional. Uma resolução melhor implicaria em um tempo computacional muito grande, e para comparação com imagens de 2 Km, como no caso das imagens AVHRR, 90 m foi considerado suficiente. Escolheu-se um valor múltiplo de 3 pelo fato da resolução do sensor TM ser 30m.

d) Definição das quadrículas

Para cálculo de área de cada classe das classificações TM e AVHRR, optou-se pela divisão das imagens temáticas em pequenas unidades amostrais de 10x10 minutos de latitude e longitude, através da função do SGI "mascarar PI". Como máscara foram utilizados 54 planos, cada um deles equivalentes a um polígono digitalizado nas dimensões citadas, compreendendo toda a área de estudo.

A função de mascarar PI também apresenta alguns detalhes importantes para imagens de baixa resolução, que devem ser descritos. A decisão se o pixel será ou não incluído como resultado da aplicação da máscara vai depender de onde o limite da máscara atinge o pixel.

Apenas se o centro de um pixel for incluído pela máscara, o pixel será incluído na imagem de saída.

Para avaliar este efeito fez-se o teste de mascarar a banda 1 AVHRR classificada, com resolução alterada para 200 m (replicação de pixels), através da função "conversão de resolução" do SGI, e comparou-se aos valores de área obtidos para a mesma imagem, com resolução de 2 km. Desta análise, e considerando-se ainda o tempo computacional em que cada resolução implicou, definiu-se a resolução para mascarar os PIs.

O resultado da aplicação das máscaras são PIs limitados pela área do polígono da máscara. Para cálculo da área de cada classe, nestes PIs, utilizou-se a função de manipulação "cálculo de área" e seus valores foram relacionados em listagem.

Os resultados destes procedimentos são as áreas das classes dos dados AVHRR e TM nas 54 quadrículas de 10' x 10' que compõem a carta topográfica e constituíram as unidades amostrais para os procedimentos estatísticos realizados.

e) Tabulação cruzada e área total das classes

A tabulação cruzada é uma função disponível no SGI que verifica as relações de sobreposição entre um PI e outro, em termos de área ocupada por cada classe. Esta função lista o valor de área ocupado por cada uma das classes de um PI que é ocupado por cada uma das classes de outro PI.

Esta função foi utilizada para avaliar os erros de classificação das imagens AVHRR, considerando-se a

imagem TM como verdade terrestre. A tabulação cruzada foi executada apenas para as duas melhores classificações (AVHRR) definidas pela avaliação estatística.

Com objetivo de avaliar se as classificações AVHRR apresentaram uma tendência para a estimativa de área total das classes cerrado com desmatamento, e floresta, comparou-se os valores totais de cada classe em relação aos valores totais obtidos para os dados TM, calculando-se a porcentagem de área sub ou superestimada pelas duas classificações AVHRR selecionadas.

3.3.8 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os dados TM e AVHRR de área das classes obtidos das aplicações das máscaras foram organizados em planilhas eletrônicas e então submetidos às análises estatísticas em aplicativos existente para cálculos estatísticos em microcomputadores linha PC.

Para a comparação estatística entre os dados de estimativa de área TM e AVHRR, também foram executadas algumas modificações nas classes definidas na interpretação visual de imagem TM. A classe de desmatamento passou a corresponder à soma dos resultados de área obtidos para as classes desmatamento, queimada, vegetação pioneira e floresta secundária, e a classe floresta correspondeu à união das classes floresta, floresta alterada e floresta de galeria. Desta forma a classe "desmatamento" compreendeu as classes onde houve atividade de retirada da cobertura florestal e encontra-se em processo de regeneração natural ou ocupada por atividade humana, e a classe "floresta" correspondeu às áreas onde a cobertura florestal original não foi intensamente alterada.

Na abordagem estatística o objetivo foi comparar os dados TM e AVHRR quanto à classificação de áreas desmatadas e áreas de florestas. O detalhamento das classes presentes na imagem TM foi utilizado para avaliar os erros da classificação AVHRR, através da execução da tabulação cruzada.

Para a região da Serra do Roncador, a avaliação estatística adotada procurou relacionar e comparar os resultados das classificações dos dados TM e AVHRR, através dos seguintes procedimentos:-

- análise de correlação;
- análise de intervalo de confiança para média;
- análise de regressão linear e análise de resíduos;
- análise dos "outliers".

Estas análises foram efetuadas sobre os valores de área das classes floresta e desmatamento, obtidos pelos dados TM e AVHRR para as 54 unidades amostrais. As classificações AVHRR utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.2. Correspondem às combinações de bandas que foram definidas pelo critério de distância J-M (Jeffrey-Matusita Distance), pela classificação de cada banda isolada e pela combinação de todas as bandas disponíveis (I, 2, 3 e IV).

A análise de correlação verificou e quantificou a existência de uma relação estatística entre os dados das classificações AVHRR e a classificação TM, através do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis (segundo procedimento descrito por Costa Neto, 1977).

TABELA 3.2 - CLASSIFICAÇÕES UTILIZADAS NA ANÁLISE
ESTATÍSTICA

IMAGEM	BANDAS	ABREVIACÃO	CLASSIFICAÇÃO
TM	3, 4, 5	TM	Interpretação visual
AVHRR	1	B1	Fatiamento nível de cinza
AVHRR	2	B2	Fatiamento nível de cinza
AVHRR	3	B3	Fatiamento nível de cinza
AVHRR	IV	IV	Fatiamento nível de cinza
AVRRR	1, 2, 3	3B	"Maxver"
AVHRR	3, IV	V3	"Maxver"
AVHRR	1, 2, 3, IV	X3	"Maxver"

Os valores de média e a distribuição dos intervalos de confiança permitiram verificar o desempenho médio das classificações AVHRR, comparando-se aos dados TM. O intervalo de confiança para média foi obtido conforme descreve Costa Neto (1977).

A média de área classificada para determinada classe TM foi considerada a média da população e os valores de média obtidos pelas classificações AVHRR foram considerados estimadores deste parâmetro populacional. A disposição dos intervalos de confiança indica quais as classificações AVHRR que fornecem bons estimadores da média populacional. Esta análise contribuiu na comparação e escolha da melhor classificação AVHRR.

A análise de regressão linear considerou os resultados AVHRR como variável dependente e os resultados TM como variável independente e seguiu o procedimento descrito por Elian (1988). O objetivo consistiu em verificar uma relação linear entre os dados, e quantificar esta relação.

Para avaliação da análise de regressão e escolha das variáveis dependentes que melhor se relacionaram com a variável independente, foram observados os seguintes critérios abaixo, conforme Elian (1988):

- a) alto valor de coeficiente de determinação, (ou de explicação), que mede a proporção da variabilidade total da variável dependente que é explicada pelo modelo. Seus valores encontram-se entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste.

Utilizou-se também o coeficiente de determinação corrigido para os graus de liberdade que é dado por:

$$R^2_{aju} = R^2 - \frac{1}{n - 2} (1 - R^2)$$

onde: R^2 = Coeficiente de determinação
 n = número de amostras

Se a amostra for grande R^2_{aju} deve ser equivalente a R^2 , mas para amostras pequenas, R^2_{aju} é pequeno, valendo sempre a relação $R^2_{aju} < R^2$.

- b) Menores valores de erro padrão da estimativa. Este erro quantifica a variabilidade dos dados de área AVHRR (variável dependente) que não é explicada pelo modelo linear proposto.
- c) maiores valores da estimativa F (Distribuição F de Snedecor), utilizado para testes de significância quanto à tendência linear entre as variáveis dependentes e independentes, e a existência de regressão.

A variável do teste F é testada pela comparação com o valor crítico $F_{1, n-2, \alpha}$ tabelado. Rejeita-se a hipótese que não há regressão se o valor de F obtido for maior que o valor crítico. Para $n = 54$, a nível de 5% de significância, F deve ser maior que 4.08. Quanto maior o valor de F, mais consistente é a afirmação de relação linear entre os dados.

Os resultados da análise de regressão também foram considerados para a escolha da melhor classificação AVHRR.

Para verificar se o modelo adotado é adequado ou não, deve-se proceder a análise dos resíduos. O resíduo é visto como a quantidade que a equação de regressão não consegue explicar ou seja, o erro cometido por se prever Y a partir de y estimado pela reta de regressão. A análise de resíduos é um método descritivo para se obter informações sobre a validade ou possíveis violações das suposições do modelo adotado. Para esta análise foram utilizados os valores de resíduos padronizados que variam entre +2 e -2 e têm a vantagem de possibilitar a comparação entre resíduos de diferentes variáveis. Este resíduo é dado por:

$$d_i = \frac{e_i}{MSE}$$

onde: e_i = resíduo do valor i

MSE = quadrado médio do resíduo

A análise dos resíduos pretende verificar o pressuposto da normalidade dos resíduos, o comportamento da variância (deve ser constante), e a aleatoriedade dos resíduos. A violação destes preceitos indica que o modelo é

instável, e que uma amostra diferente pode levar a resultados e conclusões diferentes.

Para verificar o pressuposto da normalidade dos resíduos, avaliou-se a distribuição dos resíduos padronizados: para a distribuição ser considerada normal, 65 % dos resíduos devem estar contidos no intervalo $[+1, -1]$ e 95 % no intervalo entre $[+2, -2]$.

Para verificar se a variância dos resíduos foi constante, construiu-se o gráfico dos resíduos padronizados contra os valores esperados de Y (y_i). Se os resíduos distribuem-se homogeneamente ao longo de uma faixa horizontal, então não há defeitos óbvios no modelo, indicando que a variância é constante (Montgomery e Peck, 1982).

Se o modelo é adequado, cada resíduo deve tender a 0, sendo aproximadamente metade positivos e metade negativos, sua ordenação deve produzir um arranjo sem seqüências longas de resíduos de mesmo sinal. A aleatoriedade dos resíduos é verificada através dos valores de n_1 (n^o de resíduos positivos), n_2 (n^o de resíduos negativos) e u (n^o de seqüência de resíduos de mesmo sinal).

Aplicou-se um teste de hipótese, sugerido por Elian (1988), para verificar a presença de aleatoriedade. O teste foi aplicado apenas para a variável (combinação de bandas AVHRR) que apresentou os valores de n_1 e n_2 mais discordantes, e baixo valor de u . É um teste de hipótese que considera a distribuição normal reduzida de Z e é dado por:

$$M = \frac{2 n_1 n_2}{n_1 + n_2}$$

$$S^2 = \frac{2 n_1 n_2 (2 n_1 n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)^2 (n_1 + n_2 - 1)}$$

$$Z = \frac{u - M + 0.5}{S^2}$$

A nível de 5%, aceita-se a hipótese de aleatoriedade dos resíduos se o valor de Z estiver contido entre $[-1.96, +1.96]$.

Os pontos, observados nos gráficos de regressão, externos às linhas do intervalo de confiança e que possuem valores de resíduos padronizados fora do intervalo entre $+2$ e -2 , são considerados "outliers". Verificou-se a influência destes fornecendo-se uma análise de regressão sem a presença de "outliers". Verificou-se também, nas imagens AVHRR classificadas, quais as possíveis causas destes erros.

3.3.9 - METODOLOGIA ESPECÍFICA PARA SÃO JOSÉ DO XINGU

Para a região de São José do Xingu, conforme apresentado no início deste capítulo, realizou-se os mesmos procedimentos para pré-processamento de imagem AVHRR, e interpretação visual de imagem TM adotado para a primeira região. A classificação digital de imagem AVHRR baseou-se nos resultados obtidos da análise da Serra do Roncador e foram classificadas apenas duas composições de bandas, com seus respectivos classificadores que mostraram melhor desempenho naquela região.

Os procedimentos de integração de dados e cálculo de áreas descritos anteriormente foram da mesma forma executados para esta região. A análise estatística realizada, considerou apenas os dados das duas melhores classificações AVHRR para relacioná-los aos dados TM, e consistiu de:

- análise de correlação;
- análise de regressão linear;
- análise de intervalo de confiança para a média;

- aplicação do modelo linear obtido para a região do Roncador.

Estes procedimentos correspondem aos descritos para a região do Roncador, exceto o último item, que é descrito a seguir.

- Aplicação do modelo linear obtido.

Este procedimento teve por objetivo avaliar a aplicabilidade da equação de regressão obtida para a área de estudo da Serra do Roncador em outra área, neste caso, a região de São José do Xingu.

Os resultados de área das classes floresta e desmatamento, para as 54 unidades amostrais das duas classificações AVHRR utilizadas para a região de São José do Xingu, foram utilizados como valores de X nas equações de regressão linear obtidas para a região do Roncador. Obteve-se assim, os valores de área (Y) de floresta e desmatamento resultantes da equação.

Estes valores resultantes da equação utilizada (Y) foram comparados aos valores obtidos na interpretação visual da imagem TM respectiva, que teve o mesmo procedimento metodológico descrito para a região do Roncador.

Para esta comparação os valores de área obtidos a partir da equação de regressão foram subtraídos daqueles obtidos através dos dados TM, considerados corretos. Calculou-se o erro total obtido para as 54 quadrículas, a média aritmética dos erros por quadrícula e a porcentagem de erro ponderada em relação à área total de cada classe, para cada uma das classificações AVHRR.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo descreve os resultados da aplicação da metodologia proposta para as regiões da Serra do Roncador e São José do Xingu, relacionando-os à possibilidade do uso de imagens AVHRR para detecção e monitoramento de alterações da cobertura florestal.

4.1 - SERRA DO RONCADOR

4.1.1 - INTERPRETAÇÃO VISUAL DE IMAGEM TM/LANDSAT

Da interpretação visual de imagens TM obteve-se uma mapa temático, que pode ser observado na Figura 4.1. Esta Figura apresenta o mapa já digitalizado, no SGI. Desta forma, é um dado manipulável digitalmente e georeferenciado em coordenadas UTM, uma vez que foram utilizados pontos de controle da carta UTM (MIR 322) para referenciar o produto da interpretação.

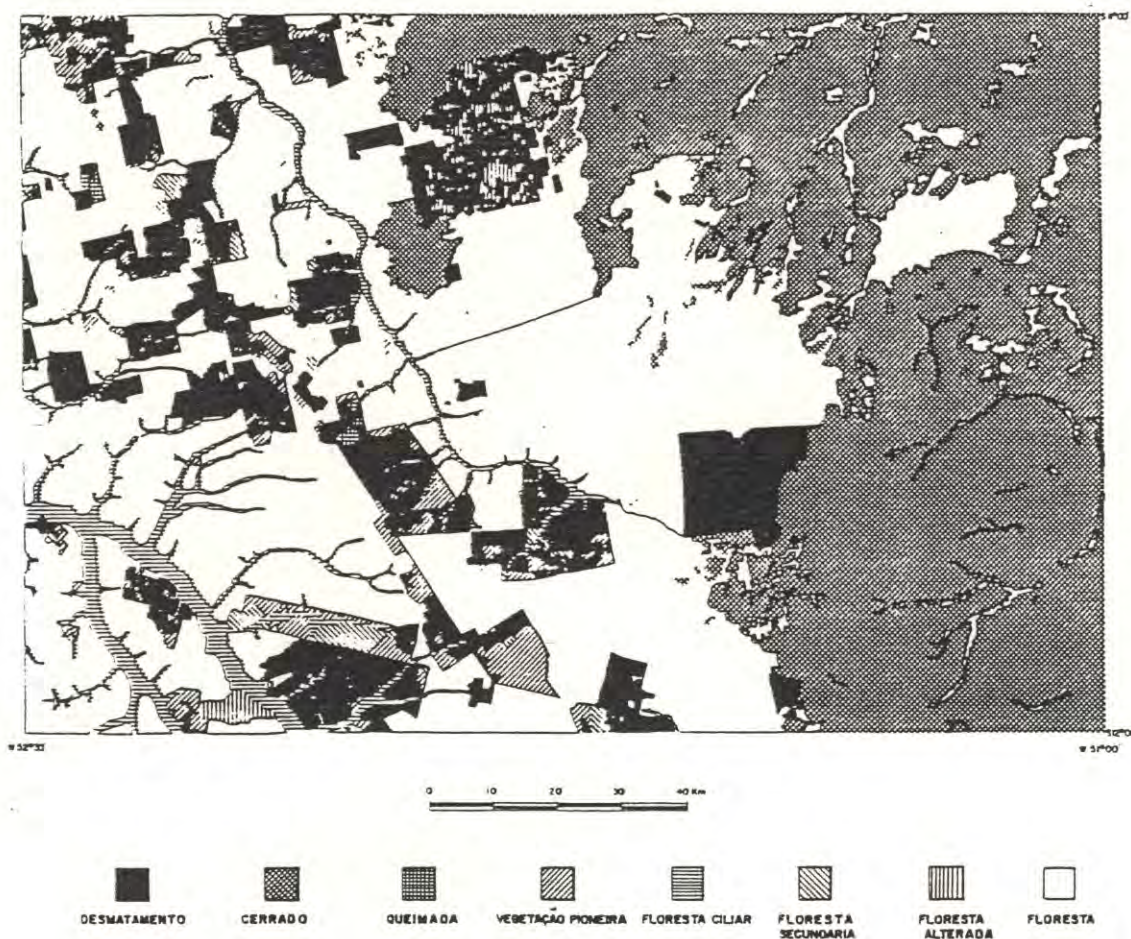


Fig. 4.1 - Mapa temático resultante da interpretação visual de imagem TM/Landsat.

4.1.2 - VERIFICAÇÃO DE CAMPO

As figuras a seguir ilustram os padrões detectados no trabalho de campo na região da Serra do Roncador que foram classificados nas imagens TM/Landsat, utilizadas como referência para as classificações AVHRR/NOAA.

São apresentadas basicamente as classes floresta, queimada, vegetação pioneira, floresta

secundária, floresta alterada, desmatamento e cerrado (descritas no item 3.3.1 - Interpretação visual de Imagem TM/Landsat), que foram identificadas pela classificação TM. As fotografias aéreas permitem esclarecer as diferenças entre as classes, elucidando e ilustrando a descrição apresentada na metodologia.

A Figura 4.2 ilustra as classes floresta, floresta alterada, floresta secundária e vegetação pioneira, apontando diferenças entre estas classes.



Fig. 4.2 - Aspectos gerais das classes floresta, floresta secundária e vegetação pioneira, verificadas na região da Serra do Roncador.

A região de vegetação pioneira, na Figura 4.2, apresenta manchas verdes homogêneas, características de vegetação arbustiva, e o solo não encontra-se completamente encoberto pela vegetação. A região de floresta secundária, por sua vez, apresenta-se com limite retilíneo com a área de floresta, indicando que toda a cobertura florestal foi anteriormente retirada, e atualmente apresenta-se com fisionomia florestal muito semelhante à área de floresta que não sofreu alteração. A classe floresta alterada é verificada nesta figura por uma mancha de coloração acinzentada, diferente da apresentada pela floresta.

A Figura 4.3 ilustra as classes floresta, queimada e vegetação pioneira. Observa-se que parte da área teve sua cobertura florestal retirada e que foi submetida ao fogo, constatado pela presença de árvores carbonizadas no solo, dando-lhe um aspecto escuro, acinzentado. Na área de vegetação pioneira observa-se a presença de solo exposto. A cobertura vegetal é ainda insipiente e basicamente constitui as chamadas "juquiras", de porte arbustivo.



Fig. 4.3 - Vegetação pioneira, desmatamento e queimada em área de floresta na região da Serra do Roncador.

A Figura 4.4 apresenta as diferenças entre a classes floresta, vegetação pioneira e desmatamento. Nesta Figura a distinção entre as classes é nítida, e o padrão de vegetação pioneira é característico. À direita da figura observa-se a área de desmatamento completamente desprovida de vegetação. No centro e à esquerda, observa-se a continuidade do limite da área de desmatamento (estradas), coberta por vegetação pioneira. O tom de verde é mais claro e uniforme que o verificado para as regiões de floresta, acima na foto.



Fig. 4.4 - Contraste entre as classes floresta, vegetação pioneira e desmatamento.

A Figura 4.5 ilustra a ocorrência de manchas de floresta em área de domínios de campos-cerrados. Observa-se que esta área de floresta está associada à diferença na topografia da região.

As observações das áreas de florestas, durante o voo de reconhecimento, indicaram diferenças fisionômicas o que justifica a utilização de mais de uma classe adotada para caracterizar áreas de domínio florestal. Diferenças como presença de palmeiras, composição de espécies em floração e homogeneidade da cobertura, verificadas no sobrevôo, são refletidas nas características espectrais das áreas de floresta.



Fig. 4.5 - Ocorrência de floresta em domínio de campos-cerrados.

4.1.3 - PRECISÃO DA DIGITALIZAÇÃO DE DADOS ANALÓGICOS

A Tabela 4.1. apresenta as diferenças observadas entre coordenadas de pontos localizados no mapa digitalizado a partir da interpretação visual de imagem TM em 1:250.000, e na carta topográfica de mesma escala que serviu de base para a localização de pontos para calibração.

Observa-se que há um maior deslocamento em X (longitude) para a direção oeste e algumas variações menores em Y (latitude) tanto para o norte quanto para o

sul. Ao se considerar a resolução da imagem TM (30m), deslocamentos da ordem de 800 m e de 150 m (X e Y, respectivamente) são considerados significativos, uma vez que é possível trabalhar-se em imagens digitais, com técnicas de processamento de imagem, até a precisão de 0,5 "pixel" (15 m).

TABELA 4.1. - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS NA CARTA TOPOGRÁFICA E NA INTERPRETAÇÃO DIGITALIZADA

PONTOS	DIFERENÇAS EM COORDENADAS PLANAS (m)	
(1)	X: -122,6	Y: -375,92
(2)	X: 1208,47	Y: -94,08
(3)	X: 1018,72	Y: 70,03
(4)	X: 863,69	Y: -169,95
(5)	X: 1003,06	Y: 37,77
(6)	X: 978,27	Y: -77
(7)	X: 303,60	Y: -236,52
(8)	X: 1012,12	Y: -140,31
MÉDIA ABSOLUTA	X: 813,82	Y: 150,20

O erro permitido em cartas topográficas equivale de 0,5 mm vezes a escala do mapa (1:250.000), o que corresponde a 125 m. Os deslocamentos obtidos para Y encontram-se na faixa de erro esperada para a carta utilizada. Contudo 830 m, o valor médio no eixo X, é um deslocamento que deve ser considerado como erro de posicionamento dos dados. Atribui-se este erro à ausência de correção geométrica da imagem, para uma projeção cartográfica definida, anterior à digitalização dos dados no SGI. Apesar deste erro ter sido detectado, após a digitalização não houve como minimizar seu efeito, e desta forma, encontra-se incorporado ao dado.

Estes dados indicam que na digitalização de dados no SGI, as referências de coordenadas para uma determinada projeção são fontes de erro que devem ser consideradas e minimizadas ao se trabalhar com imagens analógicas.

4.1.4 - PRECISÃO DA IMAGEM DIGITAL

A imagem TM/Landsat, bandas 3, 4 e 5, no formato digital, referente a uma porção da área da Serra do Roncador, e degradada para pixels de 90 m, foi registrada inicialmente com a carta topográfica MIR 322. Contudo, a escala da carta (1:250.000) impossibilitou a aquisição de pontos de controle na imagem. Foi necessário uma escala maior para o bom posicionamento dos pontos de controle. Assim, foram utilizadas as cartas topográficas referentes à área, na escala de 1:100.000 (MI-1765 e MI-1764, (IBGE, (1986a) e IBGE, (1986b) respectivamente), nas quais o erro associado é de $0,5 \text{ mm} \times 100.000 = 50 \text{ m}$.

Foram adquiridos 10 pontos de controle, sendo 4 utilizados para gerar a equação de mapeamento. O erro interno para os 4 pontos utilizados no mapeamento foi de 0,475 pixels (1 pixel = 60 x 60 m), e para os 6 pontos não utilizados foi de 1,608, definindo a precisão total do registro em 1,6 pixel.

O principal fator que limitou a precisão do registro em 1,6 pixel, ou seja, 96 metros, foi a dificuldade de não haver muitas feições passíveis de serem considerados pontos de controle.

Contudo, uma verificação posterior das localizações de 8 pontos na imagem, apresentou diferenças médias de 65 m em X, e 101 m em Y, comparando-se as

coordenadas da imagem às das cartas. Esta comparação indicou deslocamentos médios da ordem de um pixel. Tal precisão geométrica é suficiente para a comparação com imagens AVHRR, de 2 km de resolução.

4.1.5 - NAVEGAÇÃO E CORREÇÃO GEOMÉTRICA DA IMAGEM AVHRR/NOAA

A imagem AVHRR original, com resolução de 1,1 km, sem correção geométrica, pode ser visualizada na Figura 4.6. Nesta, a área de estudo compreendida entre $11^{\circ} 00'$ e $12^{\circ} 00'$ de latitude sul e $49^{\circ} 30'$ e $50^{\circ} 00'$ de longitude oeste, é representada por uma figura irregular devido às distorções resultantes do imageamento.

Após o procedimento de navegação, ajustando o arquivo de parâmetros da imagem, a correção geométrica foi aplicada apenas sobre a área compreendida pelas coordenadas de estudo. A imagem resultante pode ser observada na Figura 4.7, notando-se que as feições espaciais originais foram mantidas na imagem resultante, mesmo com perda da resolução espacial, e que a geometria interna foi alterada. Após a correção geométrica, a imagem apresentou-se na projeção cilíndrica eqüidistante.

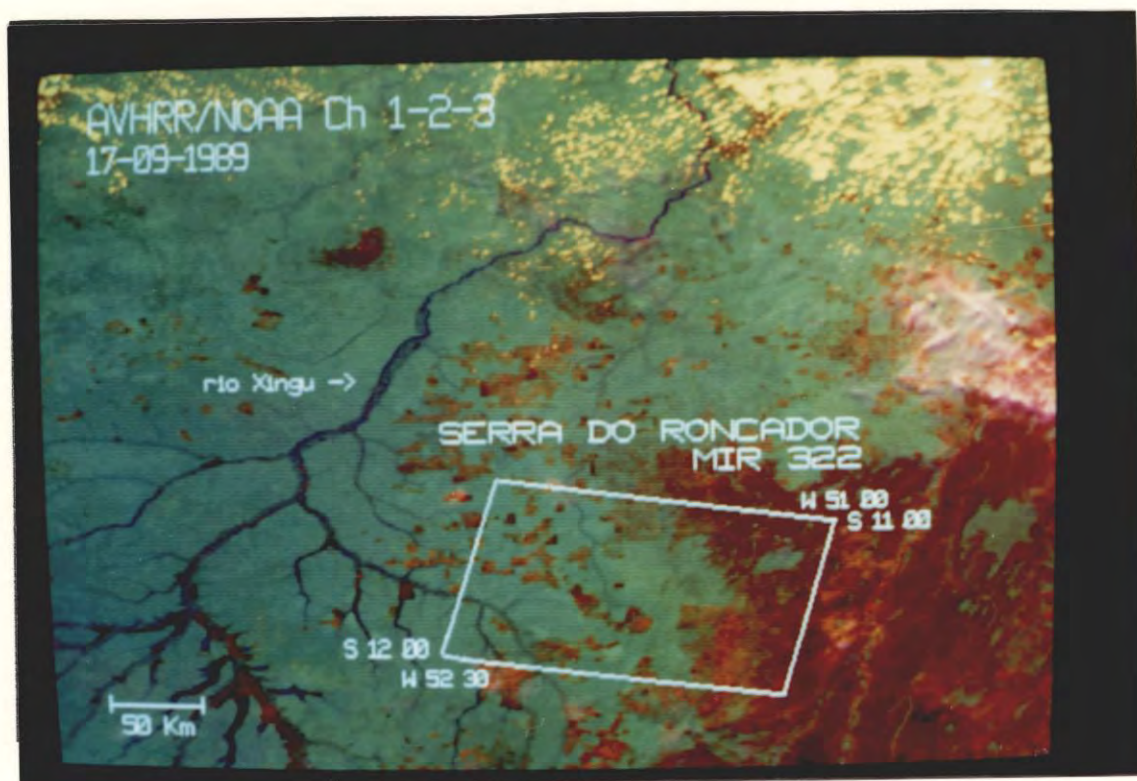


Fig. 4.6 - Imagem AVHRR/NOAA original, referente à área de estudo.

A alteração na geometria e resolução da imagem, modificou muito pouco seu histograma. Isto decorreu da reamostragem no processo de correção geométrica ser resultado do valor médio dos pixels de 1.1 km utilizados para cada pixel mapeado.

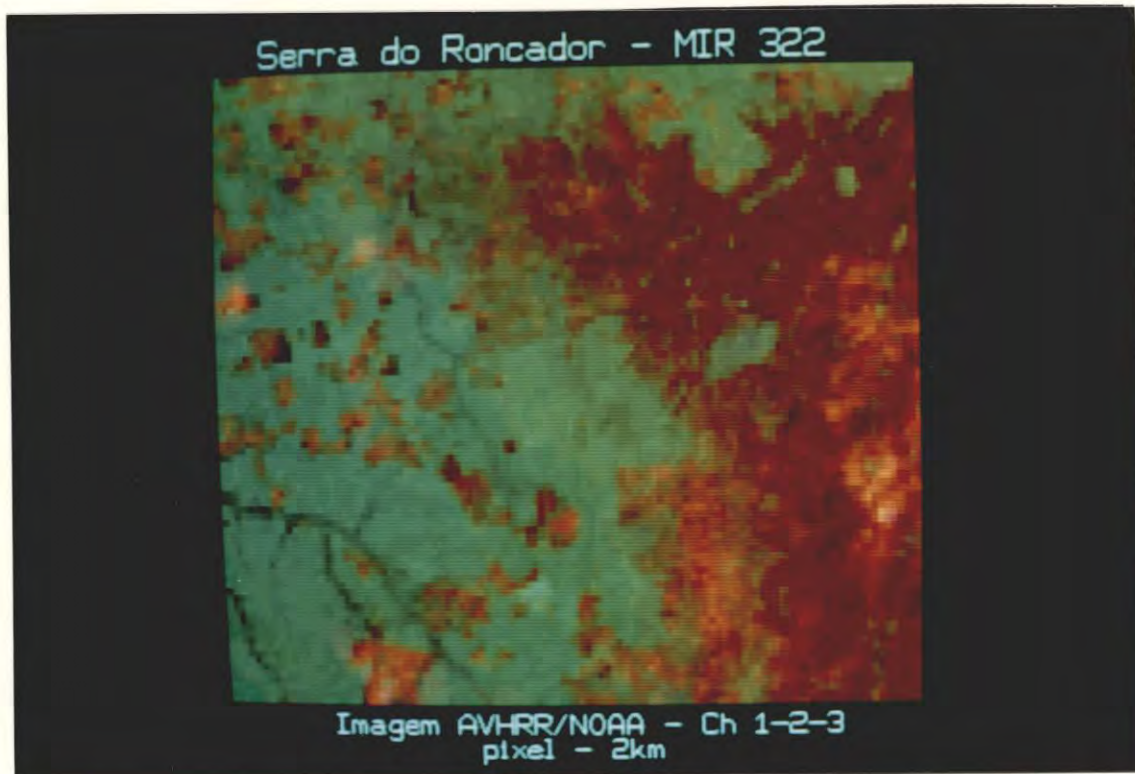
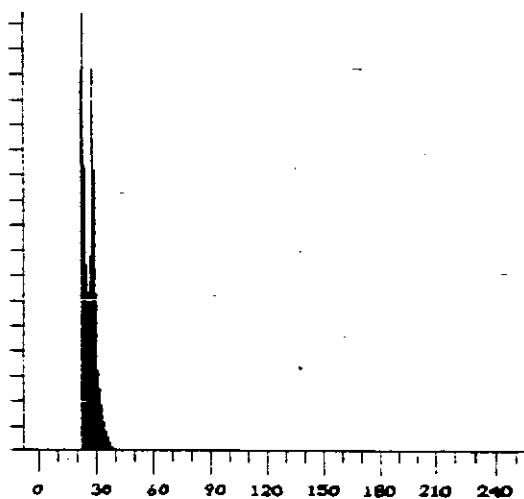
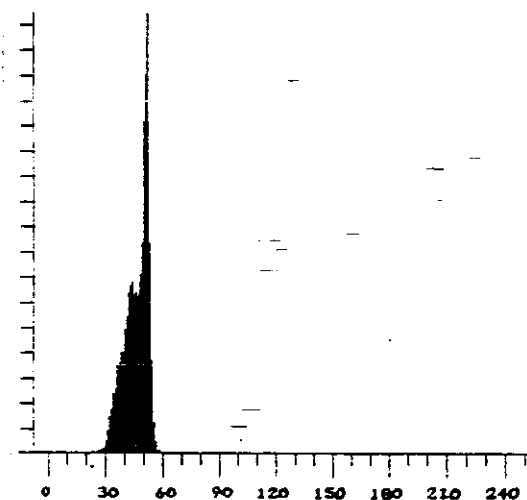


Fig. 4.7 - Área de estudo na imagem AVHRR/NOAA, resultante da correção geométrica (2 km de resolução).

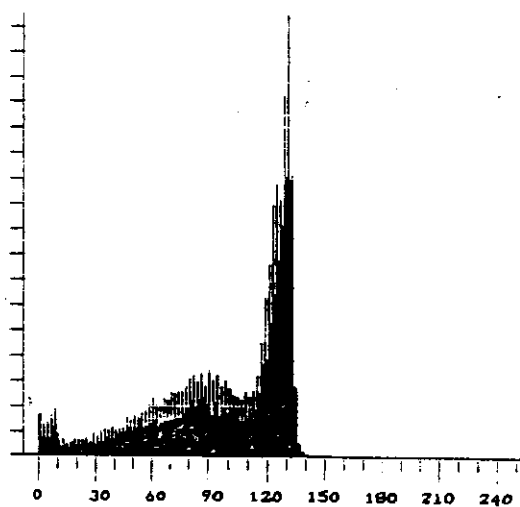
As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os histogramas das imagens original e corrigida, respectivamente, e onde pode-se verificar a manutenção das características espectrais na imagem processada. O processo de correção geométrica da imagem AVHRR, ao reamostrar os pixels para 2 km, não modificou sensivelmente o padrão geral (frequência de pixels em cada nível digital) dos histogramas das bandas.



4.8a - banda 1 AVHRR



4.8b - banda 2 AVHRR



4.8c - banda 3 AVHRR

Fig. 4.8 - Histogramas das bandas 1-2-3 AVHRR da área de estudo, imagem original.

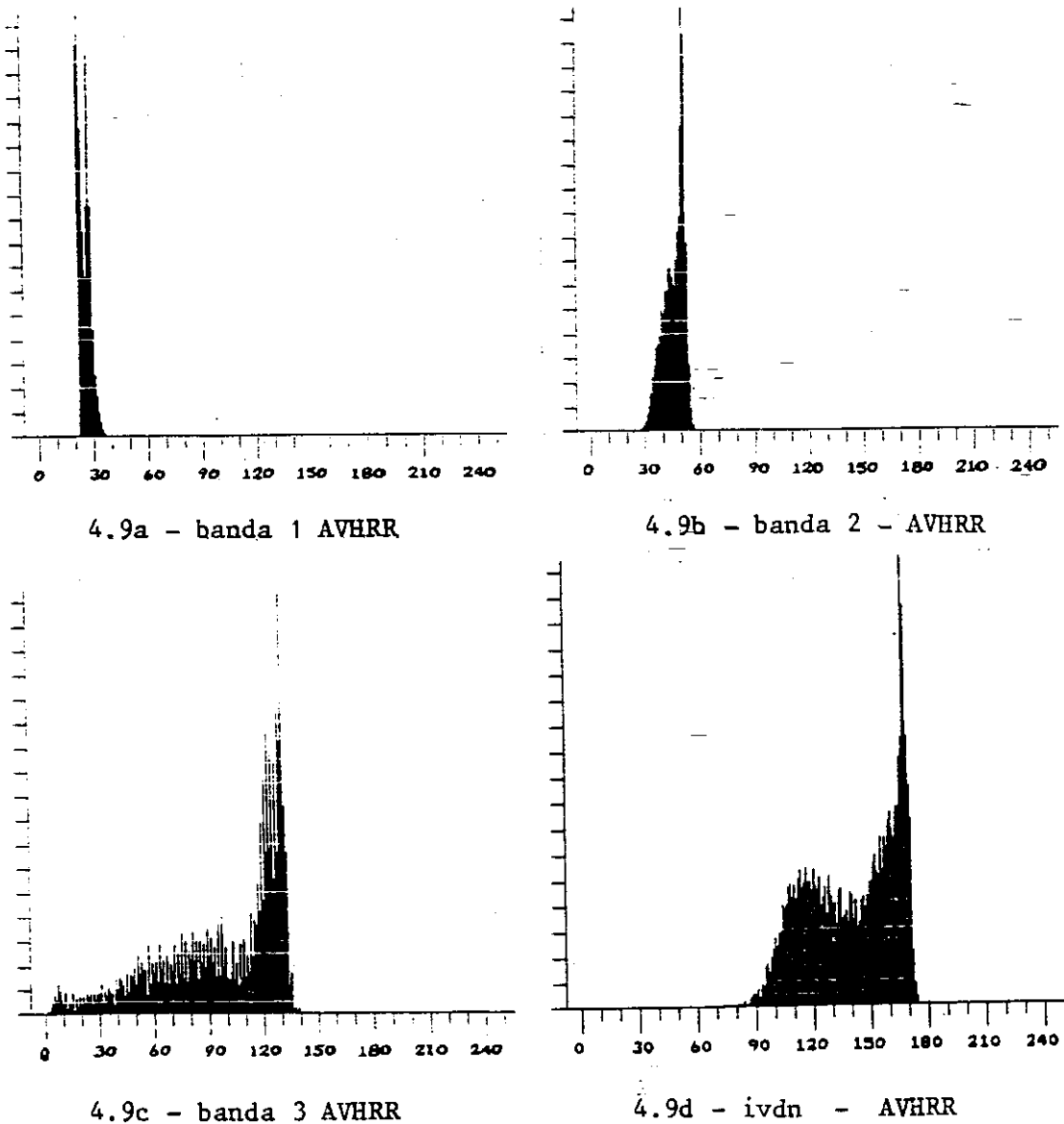


Fig. 4.9 - Histogramas das bandas 1-2-3-IV AVHRR da área de estudo, imagem corrigida geometricamente.

4.1.6 - ANÁLISE DE HISTOGRAMAS E CÁLCULO DAS ESTATÍSTICAS

Este item descreve as características da imagem do sensor AVHRR, com resolução radiométrica de 8 bites, referente à área do Roncador, analisando os

histogramas e as correlações entre as bandas espectrais utilizadas.

A imagem da banda 1 mostrou-se relativamente escura, caracterizada por pouco contraste entre os alvos. Este aspecto resultam do histograma da imagem (Figura 4.8a) que apresentou níveis de cinza apenas entre os valores de 22 a 39, no intervalo de 256 níveis digitais possíveis.

Atribuiu-se estas características ao fato da banda 1 possuir um estreito intervalo espectral (580 a 680 nm), no qual pouca radiação é refletida pela vegetação, e ser susceptível a interferências atmosféricas de absorção e espalhamento da radiação que causam atenuação do sinal e baixo contraste entre alvos.

Da análise do histograma da banda 1, e da análise da imagem, verifica-se a ocorrência de dois picos de frequência: um referente à classe floresta e o outro referente às classes com cobertura vegetal ausente, ou menos densa, com maior contribuição da refletância do solo (classes cerrado, desmatamento, queimada, vegetação pioneira), ambos muito próximos espectralmente.

A banda 2, na porção do infravermelho próximo, apresenta um histograma com maior amplitude de nível de cinza, refletida em sua variância ($S^2 = 34.61$), e com valores mais elevados que aqueles observados para a banda 1 (Figura 4.8b). Isto se explica devido a radiação do infravermelho próximo ser refletida com maior intensidade pela vegetação que a radiação no espectro do visível e menos atenuada pela atmosfera. Este histograma também distingue dois valores de nível de cinza de maior frequência, mas associados apenas à diferentes respostas da cobertura florestal.

Analisando-se o histograma da banda 3, verifica-se algumas particularidades que a distingue fortemente das duas primeiras. O primeiro aspecto a ser salientado é a amplitude dos valores digitais ser de 0 a 185, observados no histograma, e refletidos na variância da banda ($S^2 = 1127.04$). Estes valores são consequência de uma imagem heterogênea, com grande contraste entre os alvos, e uma imagem mais clara pela concentração de pixels entre os níveis de 110 a 185. Cabe lembrar que nesta banda a escala é invertida, e os maiores níveis correspondem às menores temperaturas.

Um segundo aspecto interessante é a existência de 3 picos ao longo dos quais distribuem-se as frequências dos níveis de cinza. O pico de maior frequência e nível de cinza (131) está associado à baixa temperatura do dossel neste intervalo de comprimento de onda. O segundo pico, de intensidade intermediária e com valores mais dispersos, na faixa de níveis de cinza entre 50 e 100, refere-se às áreas onde há contribuição preponderante do solo na resposta espectral. O terceiro grupo de níveis de cinza refere-se aos valores de 0 a 10 e está associado à presença de queimadas, ou por altas temperaturas, conforme descrito na literatura (Pereira e Setzer, 1992).

Cabe salientar a natureza complexa desta radiação, que apresenta componentes resultantes da emissão e da reflexão da energia eletromagnética pelos alvos, descritas anteriormente no item "2.3.1 - O sistema AVHRR/NOAA", do capítulo 2.

Outro aspecto do histograma da banda 3 é a ocorrência de valores de alta frequência acompanhados alternadamente por valores de baixa frequência, delineando contudo, o mesmo perfil geral do histograma. Este efeito

foi atribuído possivelmente à quantização da imagem, no procedimento de leitura, que converte dados de 10 bites (1024 níveis de cinza) para 8 bites (256 níveis).

O histograma da banda IV apresenta-se caracteristicamente bimodal, com variância $S^2 = 516.25$, entre a das bandas 1, 2 e a da banda 3, em decorrência do intervalo de níveis de cinza que ocupa (de 78 a 181). O primeiro pico, de menor frequência de número de pixels, conforme verificado na imagem, refere-se às feições mais escuras, com vegetação mais seca, correspondendo àquelas áreas ocupadas por campos ou solo exposto. O segundo pico refere-se às feições de tons mais claros, que possuem vegetação mais vigorosa correspondendo às regiões de floresta.

A Tabela 4.2 apresenta os valores de correlação (coeficiente de correlação de Pearson) entre os níveis de cinza das bandas utilizadas, e apenas para a área de estudo.

TABELA 4.2 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS AVHRR

	B1	B2	B3	IV
B1	1,0			
B2	- 0,7395	1,0		
B3	- 0,8178	0,8352	1,0	
IV	- 0,8982	0,9491	0,8846	1,0

Na Serra do Roncador há dois tipos de alvos que, devido a extensão que ocupam no terreno, têm respostas espectrais predominantes: as regiões de floresta, e aquelas onde há diferentes proporções de solo exposto (cerrado e

áreas que tiveram a cobertura florestal retirada - desmatamentos).

Na porção do espectro correspondente à banda 1, áreas de intensa cobertura vegetal absorvem a radiação neste intervalo de comprimento de onda, e o solo a reflete. Relação inversa é encontrada para a banda 2, onde a vegetação reflete a radiação em intensidade maior que as feições de solo exposto, e desta forma, as bandas B1 e B2, encontram-se negativamente correlacionadas.

A banda 1 também apresentou-se negativamente correlacionada com a banda IV. Isto se deve ao fato das áreas de floresta estarem relacionadas a valores elevados de IV, e regiões desmatadas e de cerrados com vegetação mais seca a baixos níveis de IV. Por outro lado, na banda 1, a vegetação absorve radiação neste comprimento de onda, resultando em baixos valores de nível de cinza, e o solo reflete radiação, determinando níveis de cinza mais elevados.

O maior valor de correlação foi encontrado para as banda B2 e IV, indicando redundância de informação entre elas. Este resultado era esperado, uma vez que o valor de índice de vegetação para cada pixel é resultado da combinação das bandas 1 e 2 ($IV = (B2-B1)/(B2+B1)$). A banda 2, por apresentar valores digitais mais elevados para todos os alvos que a banda 1, é a banda que mais contribui para o valor do índice de vegetação. Por outro lado, a menor correlação foi entre as bandas 1 e 2, sugerindo que estas bandas fornecem informações - menos redundantes uma em relação à outra.

Comparando-se os valores de correlação obtidos com os apresentados pelo estudo de Chen e

Shimabukuro (1991) para a região de Rondônia, observa-se menores valores de correlação que as obtidas para a região da Serra do Roncador (correlação mínima de 0,74 para as bandas 1 e 2). Os autores obtiveram correlação direta entre a banda 1 e a banda 2 (0,58), e correlação inversa entre a banda 3 e a banda 2 (-0,01), relações opostas às verificadas neste trabalho. Estas diferenças podem ser atribuídas às dimensões e tipos de alvos presentes nas duas regiões, visto que não apresentam os mesmos padrões de desmatamento.

4.1.7 - CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DA IMAGEM AVHRR/NOAA

- Seleção de Atributos

Os valores de distância J-M mínima e média sugeridos na seleção de atributos, entre 3 classes consideradas (desmatamento, cerrado e floresta) tomada duas a duas, encontram-se na Tabela 4.3, para cada combinação de bandas utilizada.

Swain e King (1973), citado por Aoki e Santos (1980), apresentam uma correlação entre os valores de distância J-M e a probabilidade de classificação correta entre duas classes. Para 95% de probabilidade de classificação correta, o valor da distância J-M corresponde a 1,50, para 85% a 1,0, e para 75% a 0,5. Os valores da distância J-M média observados para as classificações avaliadas foram relativamente próximos às probabilidades altas de classificação correta associadas a cada valor de distância J-M.

TABELA 4.3 - VALORES DE DISTÂNCIA J-M MÍNIMA E MÉDIA PARA AS MELHORES COMBINAÇÕES DE BANDAS AVHRR

COMBINAÇÃO	DISTÂNCIA J - M	
	MÍNIMA	MÉDIA
B1-B2-B3	1,2005	1,3310
B2-B3-IV	1,1927	1,3235
B1-B3-IV	1,1769	1,3230
B3-IV	1,1684	1,3123
B2-B3	1,0908	1,2678
B1-B3	0,8281	1,1966
B3	0,7715	1,1433
IV	0,1375	0,9595
B1	0,2360	0,9522
B2	0,2722	0,9162

Os valores observados para as combinações de três bandas foram próximos. Considerando a probabilidade de classificação correta que lhes seria associada, os valores estariam próximos a 90,6% para a distância mínima (1,18 a 1,20) e 93,8% para a distância média (1,32 a 1,33). Não há praticamente diferença entre as três combinações; contudo, optou-se por escolher a combinação B1-B2-B3, que apresentou o maior valor (JM média = 1,33), diminuindo assim o número de classificações a ser executado.

Para a combinação de duas bandas, os valores mínimos e médios da combinação B3-IV (1,17 e 1,31, respectivamente) são muito próximos aos apresentados para a combinação de 3 bandas. Sendo a banda IV resultante das bandas 1 e 2, sua combinação com uma destas duas bandas pouco acrescentou para a separação da classe. A combinação B1-B3 ficou abaixo do limite de 85% de probabilidade de classificação correta, e portanto apenas a combinação B3-IV foi considerada no processo de classificação.

Considerando-se uma única banda, a banda 3 foi a que melhor separou as classes, resultando em probabilidade de classificação correta média de 86%. Este valor não foi muito próximo ao obtido para a classificação com 3 bandas, porém esta classificação foi utilizada na comparação estatística para se avaliar diferenças na classificação de áreas de desmatamento e floresta, e comparar o tempo computacional em relação ao desempenho, usando-se 3 bandas ao invés de uma única.

Observa-se ainda que para as bandas IV, B1 e B2 isoladamente há uma inversão de ordenação dos valores da distância J-M mínima e média. A banda 2 teve valores de mínima e média mais próximos que os das outras bandas, indicando que há menor variância entre as distâncias, enquanto que a banda IV apresentou o valor de mínima distante da média. De acordo com o interesse, deve-se optar pela distância mínima, para separar duas classes conhecidas, ou pela distância média, para separar todas as classes. Neste caso, o interesse é a separação de todas as classes presentes. Assim os valores de distância J-M médios refletiram a prioridade de classificação das bandas.

Considerou-se ainda a combinação B1-B2-B3-IV, para a classificação abrangendo desta forma a totalidade de atributos disponíveis para a classificação. Entretanto, devido a limitações do sistema computacional utilizado, que não calcula J-M para mais de 3 bandas, não foi possível o cálculo da distância J-M para esta combinação.

- Estudo das classes

Na Tabela 4.4 verifica-se que a classe floresta possui média e intervalo distintos daqueles

observados para as classes cerrado e desmatamento, apenas na banda 3. Nesta banda, a média da classe floresta (127) corresponde ao dobro das médias de desmatamento (53) ou cerrado (63) (numa escala de 256 níveis digitais). Em todas as outras bandas analisadas há sobreposição dos limites entre as classes floresta e cerrado ou desmatamento.

As classes floresta e galeria são muito próximas, apresentando média, variância e intervalos semelhantes em todas as bandas.

TABELA 4.4 - MÉDIA (M), VARIÂNCIA (S^2) E INTERVALO (I) DE NÍVEIS DE CINZA PARA AS CLASSES DAS BANDAS AVHRR/NOAA

		B1	B2	B3	IV
FLORESTA	M	23,67	50,87	127,08	162,36
	S^2	0,09	0,77	6,71	4,57
	I	22 - 26	47 - 55	117 - 133	148 - 174
DESMATA.	M	29,34	43,47	52,79	126,63
	S^2	3,83	5,46	449,8	135,81
	I	26 - 36	36 - 49	3 - 103	104 - 155
CERRADO	M	28,74	39,68	63,44	118,71
	S^2	2,04	15,16	399,38	126,67
	I	26 - 39	29 - 50	1 - 110	90 - 151
GALERIA	M	22,33	44,58	121,63	155,04
	S^2	0,22	3,87	10,79	29,37
	I	22 - 23	42 - 48	115 - 126	147 - 167

As classes cerrado e desmatamento apresentaram valores de média semelhantes, intervalos de níveis de cinza equivalentes e variância próximos. Estes dados sugerem que as classes desmatamento e cerrado têm distribuição de frequência praticamente iguais na imagem AVHRR, e assim, dificilmente serão distintas por processos

de classificação digital que consideram apenas valores de nível de cinza, pixel a pixel, em cálculos estatísticos para classificação.

Observa-se ainda que a variância para a banda 3 nestas duas classes é superior às demais, indicando que estas classes são representadas por um grande intervalo de níveis de cinza, ou seja, áreas de cerrado e desmatamento apresentam uma grande variação de resposta espectral nesta banda.

- Classificação "Maxver"

Para a classificação "Maxver", foram avaliadas as matrizes de classificação dada pelo próprio SITIM-150, onde são listados os erros de omissão e inclusão percentuais entre as classes. Devido a dificuldade já apresentada de distinção das classes cerrado e desmatamento, permitiu-se erros de confusão entre estas classes da ordem de 20%, para garantir um desempenho mínimo na classificação das amostras de 80%.

As combinações de bandas que obtiveram 90% de desempenho na classificação, observadas nas matrizes de classificação do treinamento automático das amostras, foram escolhidas para os cálculos estatísticos, ou sejam as classificações B1-B2-B3-IV (X3), B3-IV (V3) e B1-B2-B3 (3B).

A distinção espectral de classes, feita pixel a pixel pelo classificador "Maxver", determinou a divisão da classe floresta em mais de uma classe. Foram determinadas, nas classificações de X3, B3, 3B, B1, B2, B3 e IV, até 3 classes de floresta, e eventualmente mais de uma classe de desmatamento e cerrado. Isto foi associado à

ocorrência de variações da resposta espectral do alvo. No caso da classe floresta, por exemplo, áreas situadas em diferentes condições de relevo e diferenças na composição florística exigiram a criação de mais de uma classe, para que toda a área de ocorrência de floresta fosse classificada.

A confusão das classes cerrado e desmatamento foi observada em quase todas as combinações de bandas, o que era esperado, visto a semelhança das classes, e a resultante proximidade de seus valores estatísticos de média e variância. Áreas de cerrado são ocupadas predominantemente por vegetação campestre, e os desmatamentos em geral tornam-se pastagens semelhantes a campos.

Na definição do limiar de classificação, tomando por exemplo a banda 3, a classe desmatamento ocupa todo o intervalo de 3 a 103 níveis digitais. Porém, a classe cerrado tem sua distribuição na faixa de 1 a 113 níveis, e assim, a confusão entre as classes é grande, ou seja, a distribuição de probabilidade da classe cerrado está contida na classe desmatamento.

Para evitar estes problemas, o ideal seria a aquisição de amostras ainda mais homogêneas, para a definição de distribuições mais centradas na média, e a criação de outras classes para que toda variabilidade espectral do tema fosse incluída na classificação. Entretanto, tal aquisição é dificultada pela própria resolução do pixel, que impede a devida seleção de amostras homogêneas.

- Fatiamento de nível de cinza

Na classificação da banda 1, diferenciou-se facilmente a classe floresta das demais, como indicou seu histograma bimodal (Figura 4.8a). Porém, não foi possível distinguir cerrado e desmatamento mesmo após inúmeras tentativas de determinação das classes e utilizando-se vários limiares.

A Tabela 4.5 apresenta os intervalos de nível de cinza definidos para cada classe distinta no fatiamento da banda 1. Observa-se o estreito intervalo de níveis de cinza, e a indicação de uma possível separação de florestas nas diferentes regiões geomorfológicas e em áreas de ocorrência dominante de cerrado, através de variação mínima de nível de cinza.

TABELA 4.5 - CLASSES E INTERVALOS DE NÍVEL DE CINZA
DEFINIDOS NO FATIAMENTO DA BANDA 1 - AVHRR

CLASSE	INTERVALO	Nº PIXELS
floresta no Planalto dos Parecis	21 - 23	1701
floresta na Depressão do Araguaia	24 - 24	683
floresta em áreas de cerrado	25 - 25	477
não-floresta	26 - 39	2587

Esta classificação resultou em uma imagem temática visualmente melhor que a resultante da classificação "Maxver".

A banda 2, de histograma também bimodal, apresentou como resultado do fatiamento uma imagem idêntica àquela resultante da aplicação do algoritmo "Maxver". As

classes, bem como os intervalos respectivos estão apresentados na Tabela 4.6.

TABELA 4.6 - CLASSES E INTERVALOS DE NÍVEL DE CINZA
DEFINIDOS NO FATIAMENTO DA BANDA 2 - AVHRR

CLASSE	INTERVALO	Nº PIXELS
cerrado	27 - 40	823
desmatamento	41 - 47	2218
floresta	48 - 61	1385

Foi possível apenas a distinção das três classes principais, floresta, desmatamento e cerrado, e ainda com alguma confusão entre floresta e desmatamento, apesar de um intervalo de níveis de cinza maior que o da banda 1.

Uma observação importante é que as áreas de floresta galeria, foram incluídas na classe desmatamento, provavelmente por apresentar níveis digitais mais escuros que a classe floresta, pela a presença de água absorvendo parte da radiação, e ainda pela extensão e estreita distribuição das áreas de floresta galeria. Esta classe encontra-se em intervalos de nível de cinza entre as classes desmatamento e floresta, conforme anteriormente apresentado pelos valores de média (Tabela 4.4) destas classes. Desta forma, a inclusão de floresta galeria na classe desmatamento constitui uma provável fonte de erro para classificação utilizando-se apenas a banda 2.

A classificação por fatiamento da banda 3 também apresentou grande confusão entre as classes cerrado e desmatamento, contudo visualmente a classe floresta foi

detectada segundo os limites mapeados na imagem TM. Esta classificação também apresentou um resultado visualmente melhor que aquele obtido pela aplicação do "Maxver". A Tabela 4.7 apresenta as classes e os intervalos definidos pelo fatiamento.

TABELA 4.7 - CLASSES E INTERVALOS DE NÍVEL DE CINZA
DEFINIDOS NO FATIAMENTO DA BANDA 3 - AVHRR

CLASSE	INTERVALO	Nº PIXELS
desmatamento	01 - 73	883
cerrado	74 - 118	1286
floresta	119 - 141	2374

O fatiamento aplicado sobre a banda de índice de vegetação (IV), ficou visualmente melhor que o equivalente "Maxver". A classificação definiu classes mais homogêneas que a obtida pelo classificador "Maxver", e pode-se distinguir diferentes classes de florestas, conforme observa-se na Tabela 4.8.

As classificações obtidas através do fatiamento das bandas utilizadas foram consideradas visualmente melhores que a classificação "Maxver". A análise estatística das classificações AVHRR comparando-as à classificação TM no item 5 deste capítulo considera estes resultados.

TABELA 4.8 - CLASSES E INTERVALOS DE NÍVEL DE CINZA
DEFINIDOS NO FATIAMENTO DA BANDA IV - AVHRR

CLASSE	INTERVALO	Nº PIXELS
cerrado	78 - 123	1344
desmatamento	124 - 148	1297
floresta em área de cerrado	149 - 163	1179
floresta	164 - 181	1692

4.1.8 - INTEGRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS NO SGI

A Figura 4.10 apresenta a classificação AVHRR das bandas 1, 2, 3 e IV (X3), como exemplo de uma das imagens classificadas que foram importadas para o SGI com o plano de informação no formato vetorial, resultante da digitalização manual dos dados TM sobreposto.

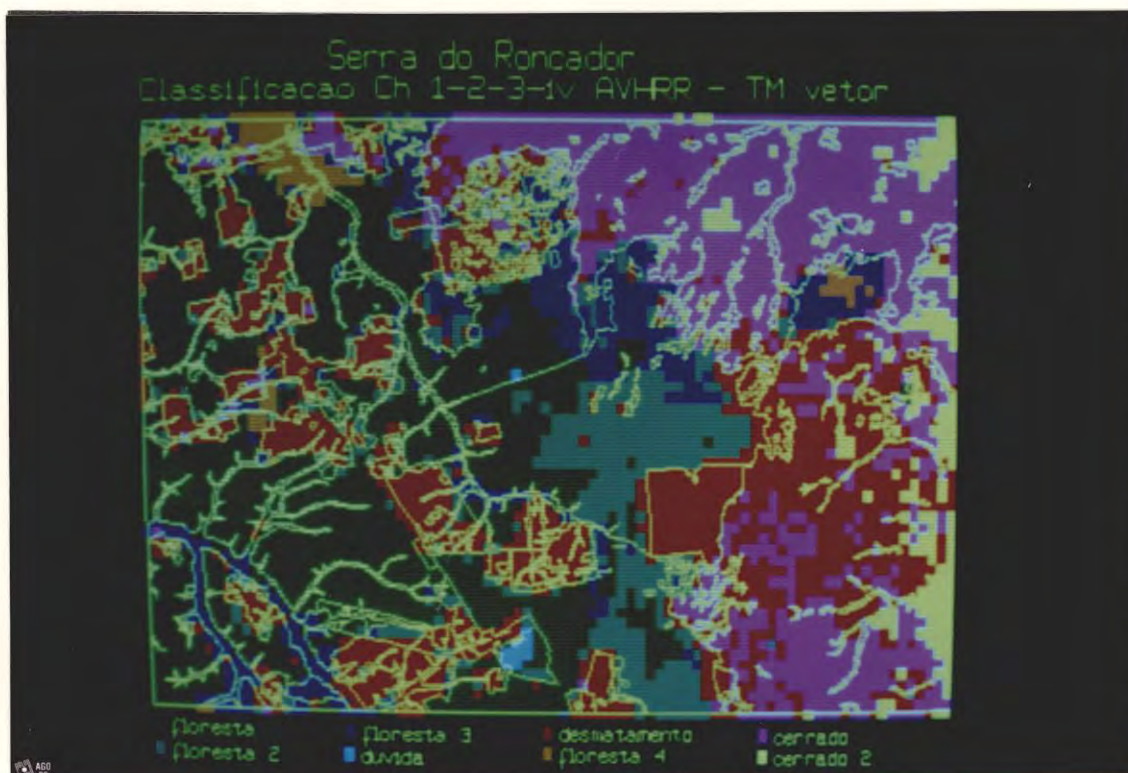


Fig. 4.10 - Classificação X3 AVHRR com interpretação visual da imagem TM digitalizada.

a) Integração de dados TM e AVHRR.

A apresentação de imagens do SGI ("display" de imagens) possui limitações próprias do sistema quando se trata de imagens de baixa resolução, como é o caso das imagens AVHRR utilizadas (2 km). Dependendo do fator de ampliação desejado, as feições da imagem AVHRR aparecem deslocadas ou não em relação às feições de referência da imagem TM. Isto decorre da função de visualização no SGI prever como critério de posicionamento dos pixels a atribuição de uma coordenada ao centro do pixel. O deslocamento de 1 pixel implica no deslocamento equivalente à resolução do pixel (no caso de 2 km), o que é

muito significativo quando se trata de uma imagem de baixa resolução. A Figura 4.11 ilustra este efeito em uma das imagens utilizadas.

O efeito descrito acima não consistiu em limitação para o uso de imagens AVHRR em SGI, aparece apenas como uma indicação visual de que não há uma sobreposição perfeita entre as diferentes fontes de dados. Na verdade, a sobreposição, considerando coordenadas de imagem linha e coluna, e coordenadas de projeção x, y, ocorre de uma maneira satisfatória, como ilustra a Figura 4.12. A melhora da sobreposição depende, além da precisão e distribuição dos pontos de controle, da precisão na digitalização de dados TM.

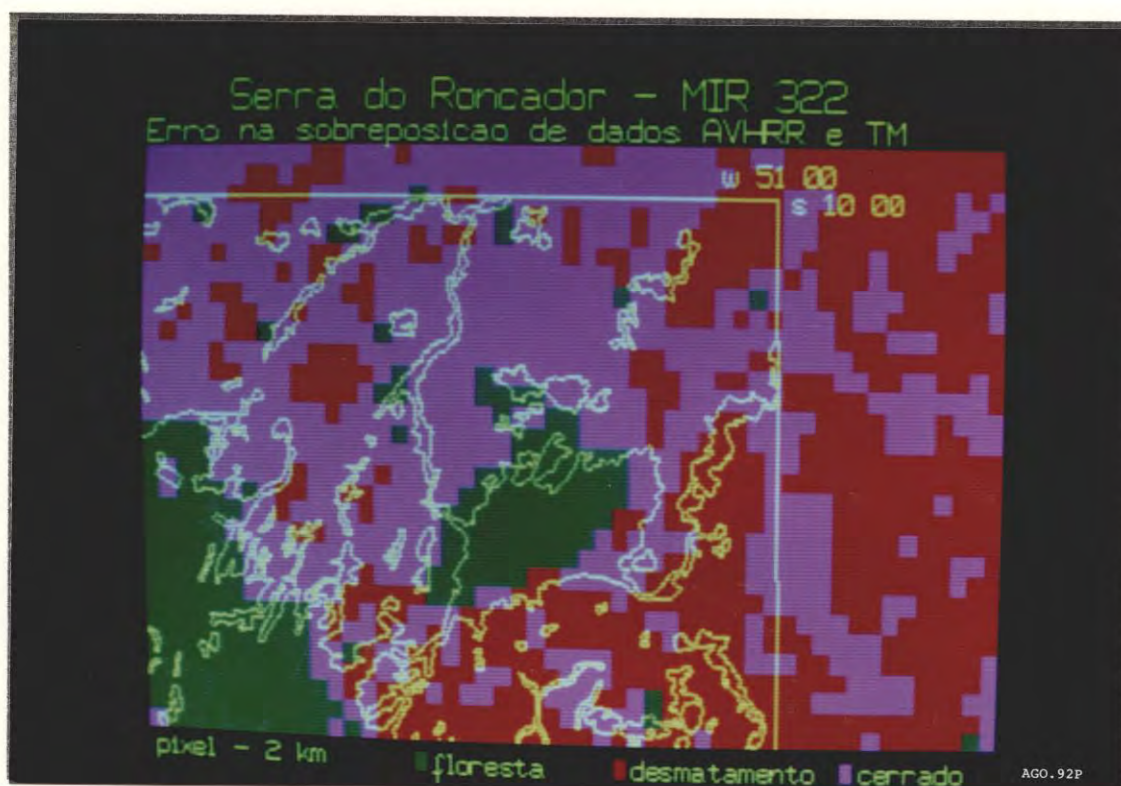


Fig. 4.11 - Efeito visual de erro na sobreposição dos dados TM e AVHRR.

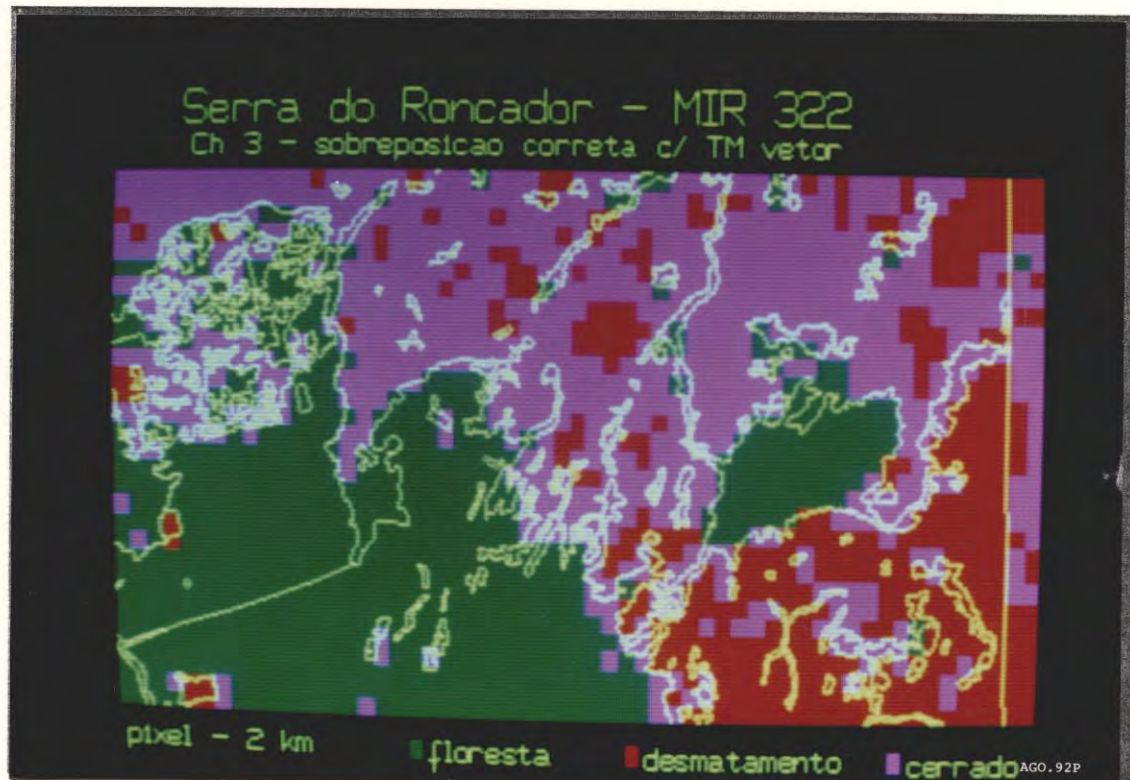


Fig. 4.12 - Sobreposição de dados TM e AVHRR correta.

Formato raster do plano de informação com dados TM

A Figura 4.13. ilustra a imagem TM com 90 metros de resolução resultante da rasterização, conforme o procedimento do item 3.3.7 "Integração dos dados no SGI", do capítulo 3. Nota-se que esta imagem ainda apresenta a definição de contornos necessária para uma separação adequada das principais classes.

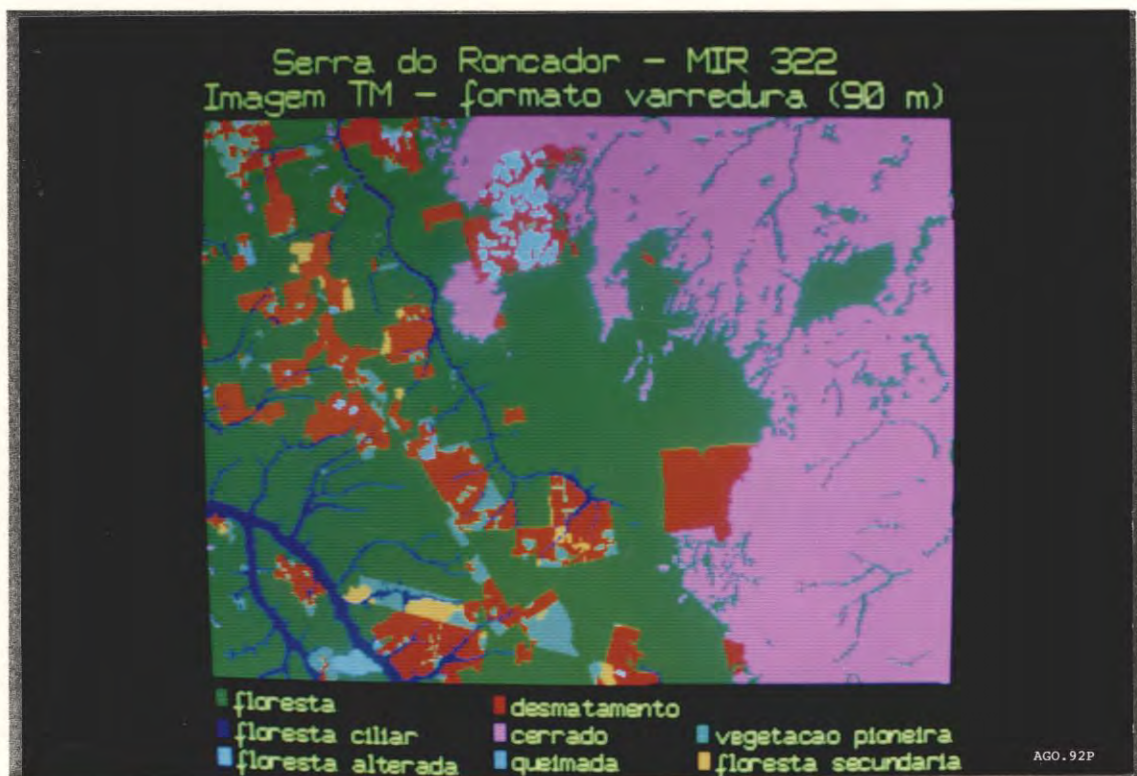


Fig. 4.13 - Interpretação visual de imagem TM/Landsat no formato varredura.

b) Mascarar Plano de Informação

Em seguida aplicaram-se as máscaras na imagem classificada da banda 1 (AVHRR), de 200 m e de 2 km de resolução para avaliar se estas diferenças trariam variação nos cálculos de área. Observou-se uma diferença média de 0,86 km² para as classes de floresta e de 1,4 km² para as classes de desmatamento. Considerando o acréscimo de tempo computacional de várias horas para gerar e mascarar imagens de maior resolução, e a pequena diferença obtida pelo refinamento, optou-se por manter a resolução da imagem AVHRR em 2 km, com a consideração de que o sistema, como atualmente implementado, limita a precisão dos dados mascarados na ordem de até 1,5 km.

4.1.9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

4.1.9.1 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

A Tabela 4.9. apresenta os valores da análise de correlação feita entre a área de floresta (classes floresta, floresta ciliar e floresta alterada), estimada pelo processamento TM, e as áreas estimadas através das classificações das bandas AVHRR. Observa-se que há correlação entre as variáveis a nível de no mínimo 0,94, ou seja, existe uma alta correlação entre as áreas de floresta estimadas pelos sensores TM e AVHRR.

TABELA 4.9 - CORRELAÇÃO ENTRE ÁREA DE FLORESTA ESTIMADA
PELAS CLASSIFICAÇÕES TM E AVHRR (n=54)

	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
TM	0,95	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97

Os valores de coeficiente de correlação encontram-se muito próximos. Contudo, a maior correlação foi a encontrada para X3 (bandas 1, 2, 3 e IV), seguida pelas classificações B3, e 3B; a menor correlação foi apresentada pela classificação B2.

Enfatiza-se o fato das correlações das bandas isoladas, e em particular da banda 3 terem sido muito próximas das correlações com classificações de composição de bandas.

A Tabela 4.10 apresenta os valores da análise de correlação feita entre a variável área de

desmatamento, estimada pelo processamento dos dados TM, e as variáveis área de desmatamento estimadas através das combinações de bandas AVHRR.

TABELA 4.10 - CORRELAÇÃO ENTRE ÁREA DE DESMATAMENTO
ESTIMADA PELAS CLASSIFICAÇÕES TM E AVHRR (n=54)

	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
TM	-0,35	-0,02	-0,23	0,07	0,30	0,16	0,04

Estes valores indicam a não existência de uma relação entre os valores de área da classe desmatamento estimada pelos dois sensores. Verificando-se os resultados do estudo das classes e os mapas temáticos resultantes das classificações AVHRR, constata-se que a delimitação das classes cerrado e desmatamento confundem-se, e não seguem a classificação das mesmas, definida pelos dados TM (Figuras 4.10 e 4.13).

A maneira encontrada para minimizar a confusão entre classes desmatamento e cerrado foi associá-las. Pretendeu-se assim verificar a capacidade do sensor AVHRR detectar áreas cobertas por formações campestres sejam elas campos naturais na área de ocorrência de cerrado, sejam campos cultivados em áreas de florestas associadas às atividades de desmatamento.

A análise estatística das estimativas de área de desmatamento somadas à área de cerrado (desmatamento + cerrado) e das estimativas de área de floresta é justificada pela presença de classes, definidas

nas aplicações do algoritmo "Maxver", que não corresponderam a floresta, desmatamento ou cerrado.

Agrupando-se então os dados de área das classes cerrado e desmatamento obtidas a partir dos sensores AVHRR e TM, obteve-se coeficientes de correlação acima de 95%, conforme apresenta a Tabela 4.11.

TABELA 4.11 - CORRELAÇÃO ENTRE ÁREA DE DESMATAMENTO + CERRADO ESTIMADA PELAS CLASSIFICAÇÕES TM E AVHR (n=54)

	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
TM	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97

A indicação de relação entre os dados fornecida pelos coeficientes de correlação, foi investigada adicionalmente através da análise de regressão linear da variável independente (valores TM) com as variáveis dependentes (classificações AVHRR) - ver item 4.1.9.3. Inicialmente foram determinados os intervalos de confiança para as médias, conforme exposto a seguir.

4.1.9.2 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA MÉDIA

A Figura 4.14 apresenta os valores de média de área estimada para as classes cerrado e desmatamento conjuntamente, e os intervalos de confiança obtidos para a classificação TM e cada uma das classificações AVHRR. Os intervalos de confiança foram obtidos para um nível de significância de 95%, com 54 graus de liberdade.

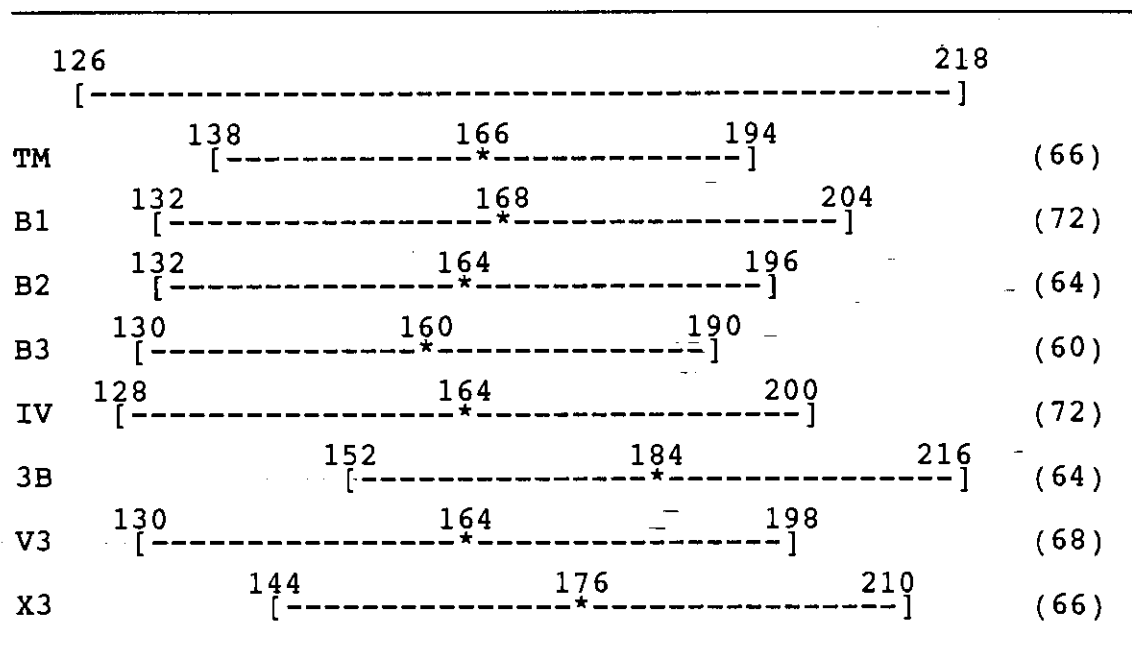


Fig. 4.14 - Intervalos de confiança([]) e médias (*) das estimativas de área de desmatamento + cerrado.

(Os números entre parênteses são a medida dos intervalos.

Tomando-se o intervalo TM como aquele que possui a média real da população, verifica-se que todas as classificações possuem secções comuns e que todas as médias estão incluídas no intervalo de confiança da média TM, e localizando-se relativamente próximas à média TM. Isto indica que os valores de área obtidos pelas classificações AVHRR foram condizentes com a obtida por dados TM, ao se considerar valores médios. A classificação 3B apresenta a média mais distante da TM e próxima do limite superior do intervalo. A combinação 3B mostrou-se o dado mais distinto em relação aos demais.

Quanto às médias, as classificações B1, B2, IV e V3 são as mais próximas da média da população (TM). São porém, as classificações cujos intervalos são maiores e compreendem o intervalo TM. São opções onde a média das estimativas foram mais condizentes com a TM, contudo apresentaram menor precisão, indicada pelos intervalos maiores para uma confiança de 0,05 na determinação da média. A combinação B2 apresentou menor intervalo, e conseqüentemente, maior precisão para a mesma confiança, na determinação da média.

Os intervalos das classificações 3B, V3 e X3 apresentaram sobreposições com o intervalo TM em porções diferenciadas em cada classificação. As classificações 3B e X3 apresentaram média e intervalo muito deslocados em relação aos TM, no sentido de superestimar os valores médios. O menor intervalo foi verificado para a banda 3 e foi indicado como o mais preciso para a confiança escolhida, embora sua média, e conseqüentemente o intervalo, estejam um pouco deslocados em relação ao intervalo TM, indicando uma possível subestimativa dos valores médios.

A Figura 4.15 apresenta os valores de média e os intervalos de confiança obtidos para a área de floresta estimada pela classificação TM e por cada uma das classificações AVHRR. Os intervalos de confiança foram obtidos para um nível de significância de 95%, com 54 graus de liberdade.

A configuração das médias e intervalos para estimativa de floresta assemelhou-se àquela obtida para as áreas de desmatamento, mas com algumas diferenças. As médias de área de floresta obtidas pelas classificações AVHRR foram incluídas no intervalo de confiança da média TM

e seus intervalos de confiança possuem secções comuns ao intervalo TM. Pode-se afirmar então, assim como para áreas de desmatamento, que os valores médios de área de floresta obtidos pelas classificações AVHRR foram condizentes com a obtida por dado TM.

As médias das classificações B1 e V3 foram as mais próximas à média TM, contudo, apresentam grandes intervalos, indicando imprecisão, para a confiança fixada.

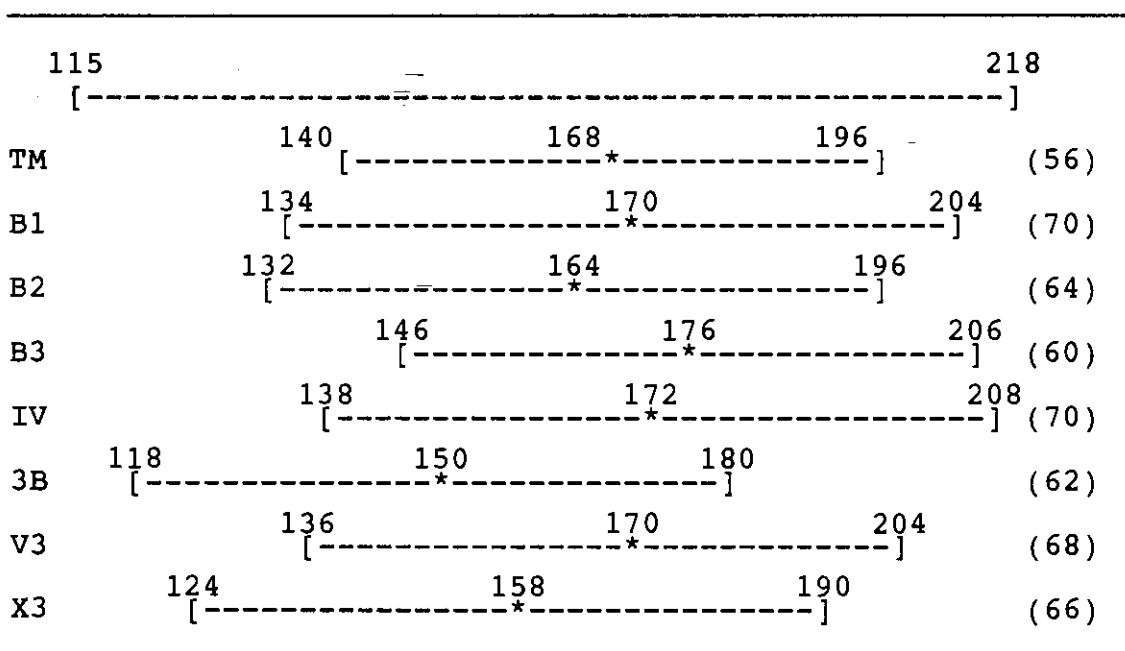


Fig. 4.15 - Intervalos de confiança([]) e médias (*) das estimativas de área de floresta.
(Os números entre parênteses são a medida dos intervalos)

As classificações B1, B2, IV e V3 também para floresta compreenderam à classificação TM, sendo para B2 o menor intervalo.

As classificações 3B e X3 apresentaram médias e intervalos bem deslocados em relação aos TM, subestimando áreas de floresta. A classificação B3 também apresentou-se deslocada, superestimando valores de floresta, contudo com mais precisão que qualquer outra classificação.

Da observação dos intervalos de confiança para as médias das estimativas de área pode-se verificar que a banda 2 apresentou valores médios mais próximos aos TM para floresta e desmatamento, e que a banda 3, apesar de ter subestimado valores médios de área de desmatamento, apresentou-se como a mais precisa para o nível de confiança adotado.

4.1.9.3 - ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR

Os resultados obtidos da análise de regressão linear para a estimativa de área de cerrado e de desmatamento (C+D), apresentaram a mesma ordem de resultados verificada para os valores de correlação (Tabela 4.12).

Os valores do coeficiente de determinação (R^2) e de determinação ajustado para os graus de liberdade da amostra foram maiores para a classificação X3, seguida por B3 e IV. Baixos valores foram encontrados para B2, contudo, nenhum valor abaixo de 0,85. Estes valores superaram aqueles encontrados por Santos et al., (1991), de 0,63, para uma região no estado do Mato Grosso, e Stone e Schlesinger (1990), de 0,68 para uma região da África e 0,93 para o Pará ao comparar estimativas de desmatamento com dados TM e AVHRR (observar a Tabela 4.18 para comparação final dos resultados com os observados pela literatura).

TABELA 4.12 - ÍNDICES DA ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS ESTIMATIVAS DE DESMATAMENTO + CERRADO COM TM E AVHRR

	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
R ²	0,92	0,86	0,93	0,92	0,92	0,92	0,94
R ² ADJ.	0,92	0,85	0,92	0,92	0,92	0,92	0,94
ERRO PAD.	37,2	44,8	30,7	35,6	33,6	35,2	30,1
F	582,8	308,9	641,5	633,2	585,8	593,9	797,1

Os valores de coeficiente de determinação ajustado mantiveram a mesma relação entre si que a observada para os coeficientes simples, e isto devido ao número de graus de liberdade ter sido o mesmo para todas classificações. Por outro lado, na análise iterativa sem "outliers", o coeficiente ajustado passa a ser uma medida importante (item 4.1.9.5).

Os menores valores de erro padrão da estimativa foram obtidos nas classificações X3 e B3. Estes valores de erro apontaram a classificação X3 com a variável que teve a menor quantidade de variabilidade não explicada pelo modelo adotado, ou seja, foi a variável cujos dados foram melhor explicados pela regressão linear. A diferença entre os valores de erro padrão obtidos neste trabalho e aqueles obtidos por Santos et al. (1991), de 8,915, deveu-se à grande diferença entre o número de amostras considerado neste trabalho ($n = 54$), contra o considerado por aqueles autores ($n = 960$).

Todas as regressões tiveram valores da estimativa F (distribuição de Snedecor) significativos indicando que existe uma tendência de relação linear entre as variáveis (F deve ser maior que 4,08, para $n = 54$). Os maiores valores para a análise de variância do teste F também foram relacionados a X3 e B3.

A classificação B3 proporcionou um ajuste tão bom quanto o verificado para X3, e seu erro padrão foi inferior, embora tratando-se de uma classificação onde apenas uma banda foi considerada. O resultado obtido da classificação B3 pode ser considerado tão significativo quanto o da classificação X3.

Para adotar-se o modelo linear para as estimativas de desmatamento + cerrado utilizando-se dados AVHRR, obteve-se então as classificações X3 e B3, com as respectivas equações:

$$(X3) \quad y = -6,574 + 1,1 x$$

$$(B3) \quad y = -6,614 + 1,001 x$$

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam as linhas de regressão das classificações X3 e B3 para as classes cerrado e desmatamento identificadas pelo AVHRR e aquelas com dados TM. Observa-se a forte relação linear entre os dados.

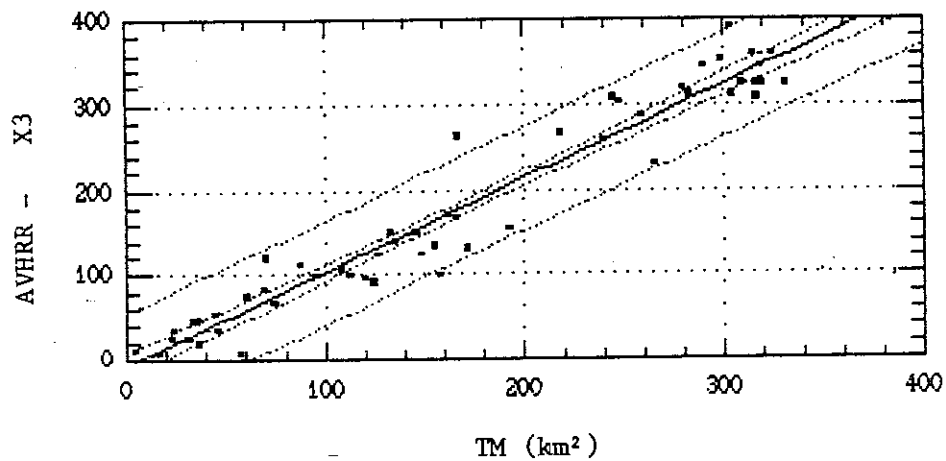


Fig. 4.16 - Regressão entre área de desmatamento + cerrado estimada pelas classificações X3 e TM.

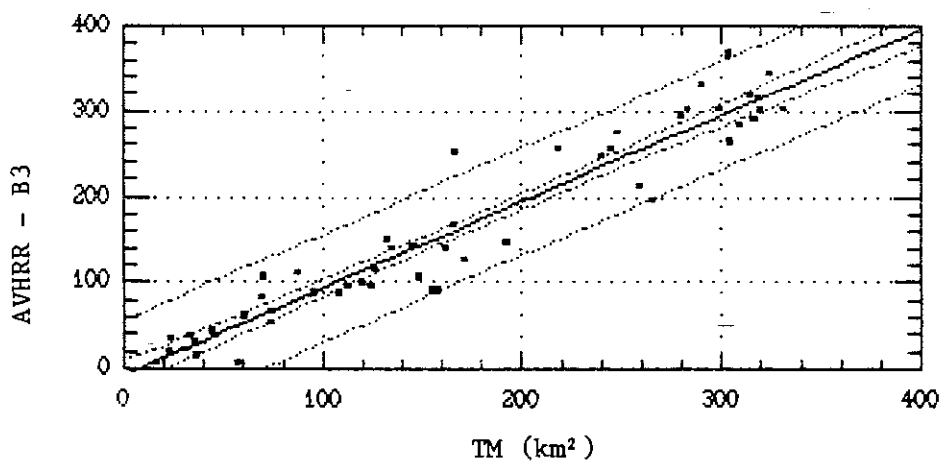


Fig. 4.17 - Regressão entre área de desmatamento + cerrado estimada pelas classificações B3 e TM.

Observou-se nas plotagens das retas de regressão a presença de alguns pontos fora do intervalo de confiança da estimativa. Estes pontos podem estar associados à presença de "outliers" que limitam o ajuste do modelo linear aos dados, através da inclusão de resíduos indesejáveis.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos da análise de regressão linear das estimativas TM e AVHRR de área da classe floresta.

TABELA 4.13 - ÍNDICES OBTIDOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS ESTIMATIVAS DE FLORESTA TM E AVHRR

	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
R^2	0,91	0,89	0,93	0,92	0,93	0,92	0,93
R^2 ADJ.	0,90	0,89	0,93	0,91	0,92	0,92	0,93
ERRO PAD.	40,2	40,2	30,0	37,6	32,4	35,1	31,2
F	493,4	413,3	662,6	562,4	645,6	594,5	741,5

Os valores do coeficiente de determinação apontaram a classificação X3 como a que melhor se adequou à regressão linear, seguida pelas classificações B3 e 3B.

O menor erro padrão da estimativa foi observado para a banda 3, seguido por X3, e os maiores valores de "F" foram obtidos para X3 e B3.

Constatou-se que as classificações que apresentaram os cálculos de área de floresta melhor relacionados linearmente com os dados TM foram X3 e B3.

Para estimativa de área de floresta a partir de dados AVHRR, utilizando-se os resultados da análise de regressão linear obteve-se as equações abaixo, obtidas para as classificações X3 e B3.

$$(X3) \quad y = -28,175 + 1,102 \, x$$

$$(B3) \quad y = 7,642 + 1,001 \, x$$

As duas retas resultantes da regressão entre as variáveis área de floresta por TM em função de X3 e B3 estimadas por AVHRR são apresentadas nas Figuras 4.18 e 4.19. Observa-se que as retas estão bem ajustadas para as classificações, apesar da presença de alguns "outliers".

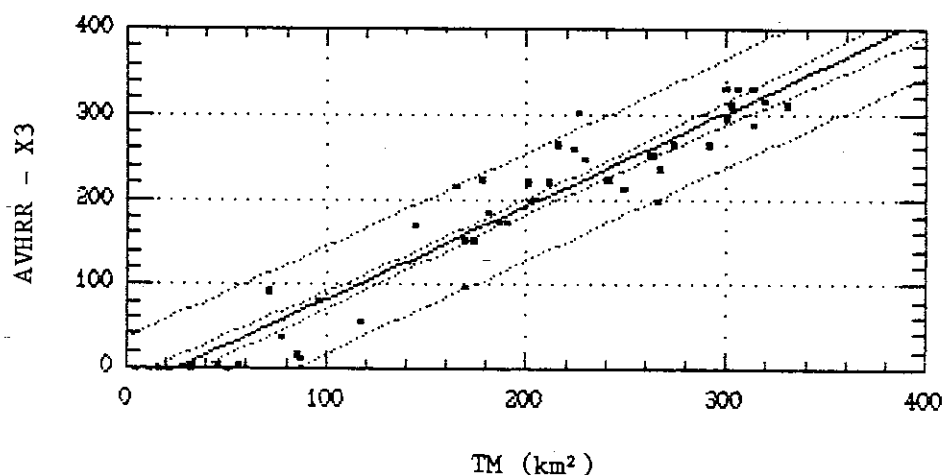


Fig. 4.18 - Regressão entre área de floresta estimada pelas classificações X3 e TM.

Observa-se que a classificação B3 apresentou os pontos mais próximos à reta, quando comparada à classificação X3, e a possibilidade de discernir áreas menores que 60 km². As retas de regressão para as demais classificações AVHRR são apresentadas no Apêndice A.

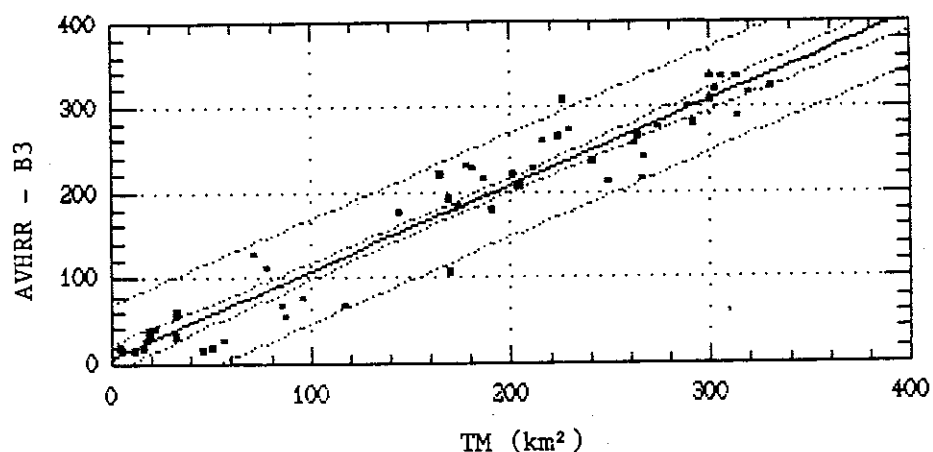


Fig. 4.19 - Regressão entre área de floresta estimada pelas classificações B3 e TM.

4.1.9.4 - ANÁLISE DE RESÍDUOS

A Tabela 4.14 apresenta o estudo da distribuição da frequências dos resíduos padronizados, obtidas segundo a descrição apresentada no item 3.3.8 análise dos resíduos.

Observa-se que a maioria dos percentuais de frequência encontram-se dentro ou próxima aos limites de 65% (intervalo de -1 a +1) e 95% (intervalo de -2 a +2), indicando que os resíduos dos erros de classificação em relação às médias, de maneira geral apresentaram distribuição normal. Cabe observar que a banda 2, no caso da classificação de florestas, apresentou percentuais abaixo dos limites, e que nas classificações de desmatamento + cerrado V3 (IV com B3) ficou abaixo do limite apenas no caso de 95% dos resíduos.

TABELA 4.14 - PORCENTUAIS DE FREQUÊNCIA DOS RESÍDUOS
PADRONIZADOS PARA DESMATAMENTO + CERRADO, E FLORESTA(%)

	Combinações de bandas AVHRR						
	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
Desmatamento + cerrado							
Intervalo							
(+1,-1)	72	68	68	68	67	72	70
(+2,-2)	96	96	94	94	98	90	94
Floresta							
Intervalo							
(+1,-1)	70	61	67	65	74	65	75
(+2,-2)	98	93	96	96	96	98	93

Valores apresentados em porcentagem (%) de pontos.

Nota: os intervalos +1 a -1 e +2 a -2 devem conter 65% e 95% dos resíduos, respectivamente.

Para B3 e X3, utilizadas nos modelos de regressão acima, os percentuais também encontraram-se dentro ou próximos dos limites, não invalidando a escolha destas classificações.

As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam os gráficos dos resíduos padronizados contra os valores estimados para desmatamento + cerrado AVHRR (Y estimado) para X3 e B3, e as Figuras 4.22 e 4.23 apresentam os gráficos para a classe floresta em X3 e B3, respectivamente.

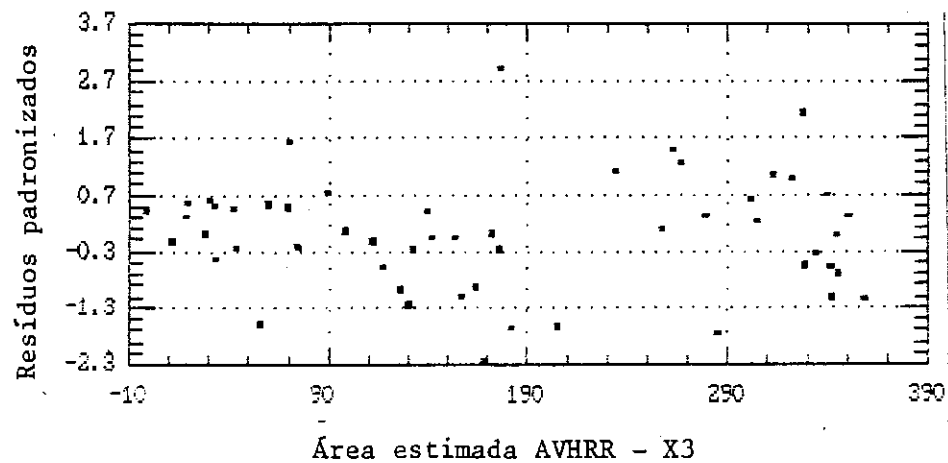


Fig. 4.20 - Plotagem dos resíduos padronizados contra valores estimados de área das classes desmatamento + cerrado X3.

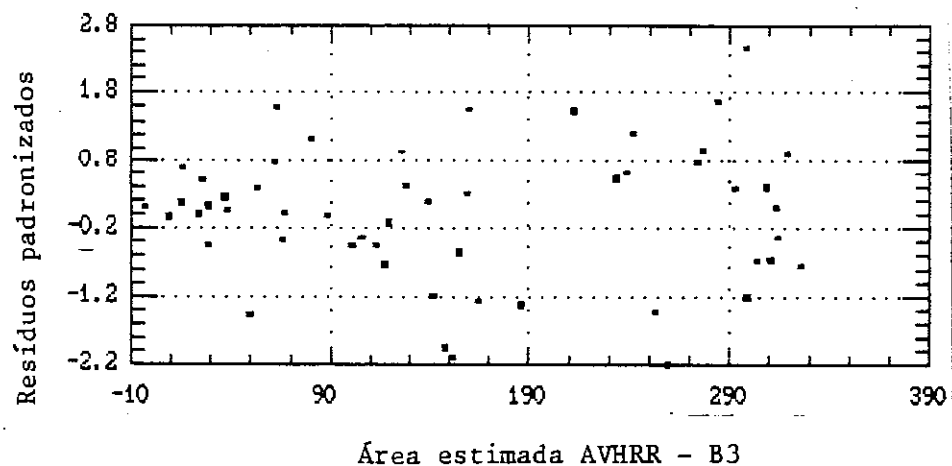


Fig. 4.21 - Plotagem dos resíduos padronizados contra valores estimados de área das classes desmatamento + cerrado B3.

Os resíduos estão distribuídos ao longo do eixo X (áreas estimadas), indicando que não houve deficiências aparentes do modelo, e que a variância não se concentrou em regiões particulares. Destaca-se a existência de alguns pontos localizados fora do intervalo de +2 e -2

entendidos como "outliers", e que foram verificados nas imagens AVHRR e TM antes de sua eliminação em novo teste de regressão.

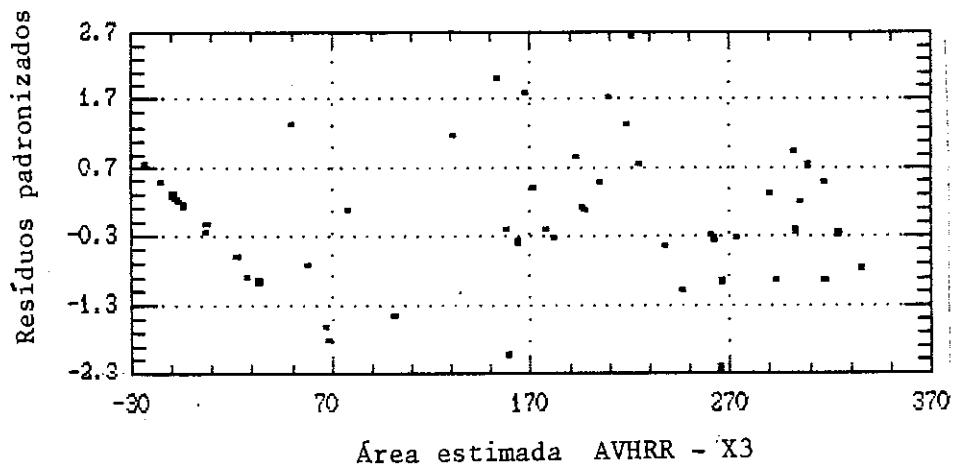


Fig. 4.22 - Plotagem dos resíduos padronizados contra valores estimados de área da classe floresta na classificação X3.

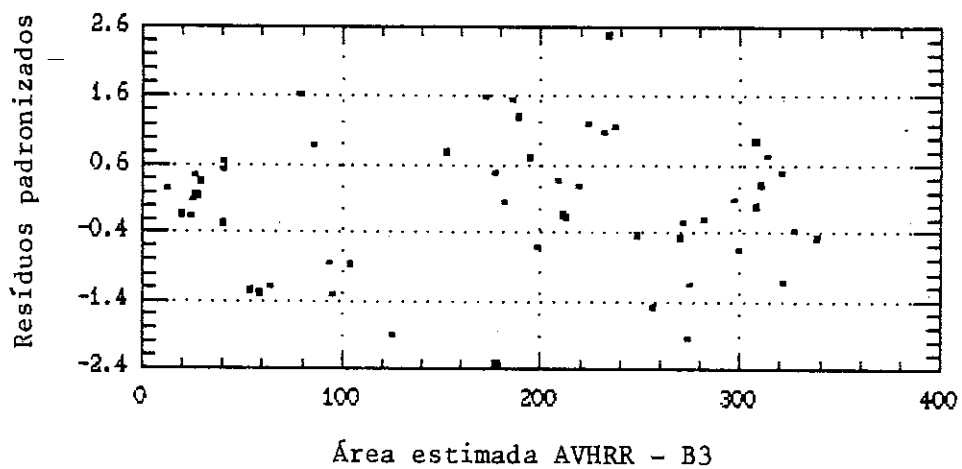


Fig. 4.23 - Plotagem dos resíduos padronizados contra os valores estimados de área da classe floresta na classificação B3.

O estudo dos sinais dos resíduos pode ser resumido na Tabela 4.15. Observa-se que há equivalência entre os valores positivos e negativos dos resíduos e que não houve grandes seqüências de mesmo sinal, verificado pelos altos valores de u (troca de sinal), entre 21 e 25 para 54 pontos.

Aplicou-se o teste de hipóteses para verificar a aleatoriedade, apresentado no item 3.3.8 - análise de resíduos, apenas para a classificação de floresta B2, por apresentar a maior diferença entre os valores de resíduos positivos ($n_1 = 36$) e negativos ($n_2 = 18$). O valor de z encontrado ($z = -0,155$) conduziu à aceitação da hipótese de aleatoriedade a nível de 5% de confiança (valor z deve estar incluído no intervalo entre $-1,96$ e $+1,96$). Este resultado comprovou o pressuposto de aleatoriedade dos resíduos para todas as combinações de bandas utilizadas.

TABELA 4.15 - ESTUDO PORCENTUAL DOS SINAIS DOS RESÍDUOS
PADRONIZADOS NAS ESTIMATIVA DE DESMATAMENTO + CERRADO E
FLORESTA

	Combinações de bandas AVHRR						
	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
<u>Desmatamento + cerrado</u>							
n_1 (+)	48	52	56	54	46	50	50
n_2 (-)	52	48	44	46	54	50	50
u	21	21	21	21	25	25	23
<u>Floresta</u>							
n_1 (+)	56	67	52	52	56	50	50
n_2 (-)	43	33	48	48	44	50	50
u	21	23	21	23	21	25	31

n_1 e n_2 dados em porcentagem (%);
 u dado pelo n° de trocas de sinal

A análise dos resíduos apresentada indicou que o pressuposto de sua aleatoriedade é válido para as regressões realizadas conforme apresentado pelo estudo dos sinais. O pressuposto de variância constante também foi considerado válido, pela observação dos gráficos de resíduo contra valores esperados. A avaliação do pressuposto de normalidade, observado através da distribuição dos resíduos, não foi mantido para as classificações B2 de floresta e V3 de desmatamento + cerrado, o que indica que o modelo linear obtido é inadequado e instável para estas duas bandas, desaconselhando-se suas utilizações.

4.1.9.5 - ANÁLISE DOS "OUTLIERS"

As unidades amostrais respectivas a estes pontos foram verificadas de modo a se buscar fontes de erros nas estimativas de área de floresta e desmatamento.

Para as estimativas AVHRR de área de floresta, os pontos 1, 2, 10, 14, 22, 25 e 46 foram considerados "outliers". Para as estimativas AVHRR de área de desmatamento + cerrado, os pontos considerados outliers foram: 1, 2, 4, 5, 14, 25 e 43. (Ver Apêndice B para as estimativas de área de cada ponto).

No ponto 1 há uma grande área de floresta secundária que foi classificada nas combinações B2, V3 e X3 como floresta, causando subestimativa de área desmatada, uma vez que floresta secundária foi considerada como uma das classes de desmatamento.

O ponto 2 encontra-se numa região de transição entre cerrado e floresta, e há erro por superestimativa de cerrado, em detrimento de áreas de floresta. Este ponto foi considerado "outlier" nas

classificações de floresta com as bandas B1, IV e X3, e de desmatamento + cerrado com as bandas B1 e IV.

Os pontos 4 e 5 na classificação V3, constituíram "outliers" devido à dificuldade de distinguir-se áreas de cerrado e floresta alterada, classificadas como floresta, o que subestimou valores de área desmatada.

No ponto 10 houve superestimativa de floresta, e a observação das imagens indicou como causa um possível deslocamento entre as imagens TM e AVHRR.

No ponto 14 houve superestimativa de floresta na classificação AVHRR da banda 2 devido a uma área de floresta secundária ter sido erroneamente classificada como de floresta. A classificação X3 também apresentou erro neste ponto, resultando em subestimativa da classe desmatamento + cerrado, nas áreas de contato de cerrado e floresta.

No ponto 22 observou-se uma região de cerrado com maior número de componentes arbóreos, o que promoveu a confusão com áreas de floresta. As classificações B3, IV, 3B, V3 e X3 superestimaram a área de floresta neste ponto.

O ponto 25 encontra-se também em uma região de transição entre cerrado e floresta com limite irregular, o que dificultou a definição exata dos limites entre estas classes. Observou-se ainda um deslocamento pequeno entre as imagens AVHRR e TM. Todas as classificações AVHRR de desmatamento + cerrado, exceto a classificação V3, subestimaram os valores de área, e as classificações B3, 3B e X3 superestimaram desmatamento.

Para o ponto 43, o erro foi atribuído à presença de floresta galeria distribuída em porções estreitas e irregulares no local, e que foi classificada como cerrado nas classificações AVHRR B3, IV, V3 e X3.

O ponto 46 apresentou erro de subestimativa de área de floresta, apenas para a banda 2, por ter classificado regiões de floresta galeria como desmatamento, conforme observado na classificação desta banda (item 4.1.7 - Fatiamento de níveis de cinza).

Os problemas encontrados para estes pontos exemplificam erros de classificação com o AVHRR. A eliminação destes pontos em nova análise de regressão visou avaliar a influência dos "outliers" na qualidade dos dados.

4.1.9.6 - ANÁLISE DE REGRESSÃO SEM "OUTLIERS"

A Tabela 4.16 apresenta os valores de coeficiente de determinação ajustado segundo graus de liberdade e erro padrão das análises de regressão para as estimativas de floresta e desmatamento + cerrado das classificações AVHRR, com e sem os pontos que constituíram os "outliers".

Observa-se nesta tabela que a alteração no coeficiente de determinação encontra-se entre 0,01 e 0,03. Para os resultados de erro padrão as diferenças encontram-se entre 1,6 e 7,6, sendo este parâmetro mais afetado pela presença de outliers.

TABELA 4.16 - ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE DADOS TM E AVHRR COM (1) E SEM (2) A PRESENÇA DOS "OUTLIERS"

	B1	B2	B3	IV	3B	V3	X3
FLORESTA							
R^2_{ADJ}							
(1)	0,90	0,89	0,93	0,91	0,92	0,92	0,93
(2)	0,92	0,91	0,94	0,93	0,95	0,93	0,96
ERRO PADRÃO							
(1)	40,2	40,2	30,0	37,6	32,4	35,1	31,2
(2)	36,2	35,5	27,0	34,2	26,9	33,5	25,4
Desmatamento + cerrado							
R^2_{ADJ}							
(1)	0,92	0,85	0,92	0,92	0,92	0,92	0,94
(2)	0,93	0,87	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95
ERRO PADRÃO							
(1)	37,2	44,8	30,7	35,6	33,6	35,2	30,1
(2)	34,3	41,8	25,4	32,4	29,0	27,6	26,5

Para as classificações de desmatamento + cerrado, o maior acréscimo de R^2 deu-se para a classificação V3 (0,032) e a maior diferença de erro também (7,61), com a eliminação de um único ponto. O menor erro padrão passou a ser aquele apresentado pela banda 3.

As Figuras 4.24 e 4.25 ilustram as retas de regressão obtidas sem a presença dos "outliers" para as combinações X3 e B3 AVHRR de áreas de desmatamento + cerrado, e as Figuras 4.26 e 4.27 para as áreas de floresta obtidas por X3 e B3, respectivamente.

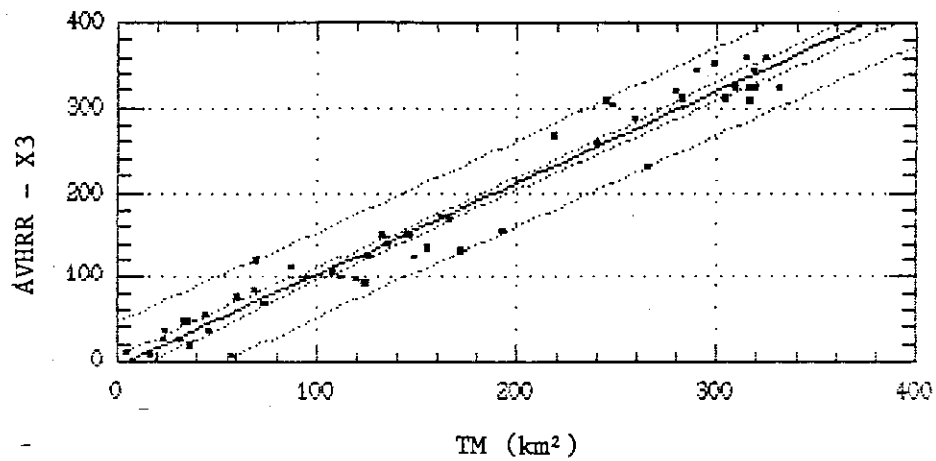


Fig. 4.24 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pelas classificações X3 e TM sem a presença de "outliers".

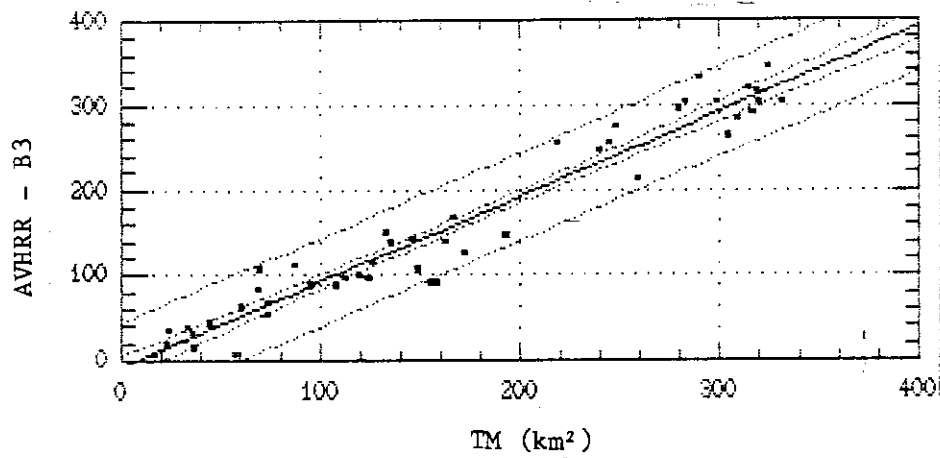


Fig. 4.25 - Regressão entre área de cerrado e desmatamento estimada pelas classificações B3 e TM sem a presença de "outliers".

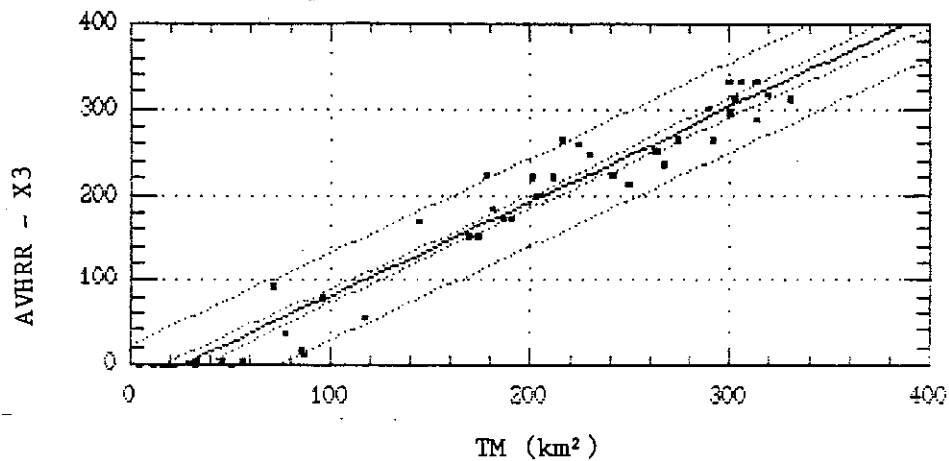


Fig. 4.26 - Regressão entre área floresta estimada pelas classificações X3 e TM sem "outliers".

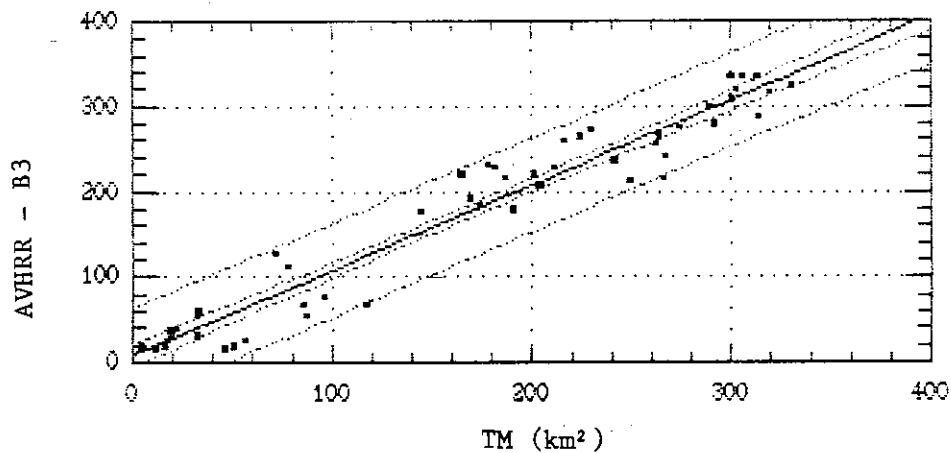


Fig. 4.27 - Regressão entre área floresta estimada pelas classificações B3 e TM sem "outliers".

De maneira geral, a presença dos "outliers" não modificou significativamente os dados da análise de regressão realizado com todas os pontos amostrais, conforme observado em suas retas de regressão, indicando que as equações de regressão inicialmente apresentadas podem ser usadas mesmo com a presença de "outliers".

4.1.9.7 - TABULAÇÃO CRUZADA E ÁREA TOTAL DAS CLASSES

Os resultados da tabulação cruzada para comparação entre os planos de informação AVHRR e TM apresentam um detalhamento dos erros de classificação obtidos nas imagens AVHRR em função das classes consideradas. A análise de tabulação cruzada foi efetuada apenas para as classificações X3 e B3 AVHRR, que tiveram os melhores resultados nas análises estatísticas. Os resultados são mostrados na Tabela 4.17 e estão apresentados em porcentagem de área das classes definidas pelos dados TM, para cada uma das classes AVHRR.

TABELA 4.17 - TABULAÇÃO CRUZADA ENTRE OS PLANOS DE
INFORMAÇÃO X3 E B3 AVHRR, E TM

	AVHRR							
	FLORESTA		CERRADO		DESMAT.		DÚVIDA	
	X3	B3	X3	B3	X3	B3	X3	
TM								
DESMATAMENTO	28	33	4	28	67	39	--	
FLORESTA	79	81	7	8	15	10	--	
FLORESTA SECUNDÁRIA	56	62	2	18	36	20	05	
QUEIMADA	50	50	--	11	50	39	--	
CERRADO	8	17	63	33	30	51	--	
FLORESTA ALTERADA	42	49	12	26	47	24	--	
VEGETAÇÃO PIONEIRA	31	31	3	26	68	42	--	
FLORESTA CILIAR	79	84	1	7	18	10	--	

Valores em porcentagem de área classificada (%).

De acordo com estes dados, a classe de desmatamento foi classificada erroneamente como cerrado em 4% de sua área usando-se X3, e em 28% com B3; 28% de sua área incluída em áreas de floresta com X3 e 33% com B3. Observou-se portanto a tendência de subestimativa de área de desmatamento através destas classificações AVHRR, e a dificuldade de classificar apenas áreas de desmatamento

como definido pelos dados TM. Áreas de cerrado devem ser consideradas áreas de desmatamento para que a classificação AVHRR seja mais precisa. Neste caso, o total de área classificada corretamente pelo AVHRR seria 71% com X3 e 67% com B3.

As áreas de floresta em relação às de desmatamento e cerrado foram melhor classificadas pelos dados AVHRR. Cerca de 80% da classe floresta foi corretamente classificada, pelas bandas X3 (79%) e B3 (81%) AVHRR, e apenas 20% de florestas foram definidas como desmatamento e cerrado. Verifica-se assim que a definição, a partir de dados AVHRR, da classe floresta é mais coerente do que a definição da classe desmatamento.

A classe floresta secundária representa uma fonte de erro e é difícil de ser detectada pelas classificações AVHRR. Esta classe teve praticamente 60% de sua área classificada como floresta e o restante como desmatamento e cerrado pelas classificações AVHRR (62% em B3, e 56% em X3). O mesmo foi observado para a classe queimada igualmente incorporada às classes de floresta (50% em B3 e X3) e de desmatamento (50% em B3 e 39% em X3) pelas classificações AVHRR.

A classe cerrado, foi melhor discriminada pela classificação X3 AVHRR (63%), porém 30% de sua área foi incluída na classe desmatamento, e na classificação B3 (33%), 51% de sua área foi entendida como desmatamento, o que reforça a impossibilidade de separar-se espectralmente estas duas classes, utilizando-se a metodologia adotada. Porém, houve pouca confusão com a classe floresta pelas classificações AVHRR, na classe cerrado (7 e 13% para X3 e B3). As manchas de floresta na região de cerrado contínuo são dificilmente detectadas pelo sensor AVHRR, com

resolução de 2km, e constituem-se em possíveis fontes de erro.

Os valores da tabulação cruzada para as áreas de floresta alterada, indicam que esta classe, encontra-se associada às áreas de pouca biomassa detectadas pelo sensor AVHRR, sendo classificadas preferencialmente como desmatamento (24% e 26% em B3) e cerrado (47% e 12% em X3). Desta forma, deve-se considerar que as classificações AVHRR incorporam áreas de floresta alterada como cerrado ou desmatamento. A classe definida como dúvida em X3, não correspondeu a nenhuma das classes de floresta e desmatamento criadas no processo de classificação. O resultado da tabulação cruzada indicou que esta classe representa áreas de floresta alterada, distinta das classes floresta e desmatamento como previsto, e correspondeu a 5% da área desta classe.

Para a classe vegetação pioneira, conforme apresentam os resultados para X3 e B3, observa-se também que seus valores de área foram principalmente incluídos nas classes de desmatamento e cerrado (68% e 3% em X3; 42% e 26% em B3, respectivamente) definidas pelos dados AVHRR.

Os resultados para as áreas de floresta ciliar, indicam que as classificações AVHRR englobaram suas áreas à classe de floresta (79% em X3; 84% em B3).

Para detectar-se desmatamento em áreas de floresta, observou-se que há menos erro de classificação ao se discriminar áreas de floresta que de desmatamento e cerrado. Apenas deve-se considerar que as áreas compreendidas pelas classes "floresta secundária" e de "floresta ciliar" estarão contidas na classe floresta, e eventualmente áreas de queimada também.

Os erros de classificação estão associados também a possíveis erros de sobreposição dos dados. Acredita-se que se a mesma relação fosse estabelecida entre imagens TM e AVHRR digitais, ou com imagens AVHRR de resolução espacial de 1 km, obteria-se a diminuição dos erros de classificação, pela correção e melhoria da geometria das imagens TM e AVHRR.

- Área total das classes

Os resultados da tabulação cruzada, ao considerar a distribuição espacial dos erros de classificação, apresentaram valores erros significativos. Contudo, a avaliação de área total das classes desmatamento + cerrado e floresta nas classificações X3 e B3, comparativamente às classes TM para a região do Roncador, apresentou melhores resultados que os da tabulação cruzada, por apenas comparar os valores de área.

Para a classificação X3, a área total de floresta foi subestimada em 6% e a área de desmatamento + cerrado foi superestimada em 7%. Para a classificação B3, observou-se 5% de superestimativa da área total de floresta e 2% de subestimativa da classe desmatamento + cerrado.

Estes valores indicam que há relativamente pequena diferença entre as estimativas TM e AVHRR, e que a subestimativa ou superestimativa também depende do procedimento de classificação e bandas AVHRR utilizados. Observa-se que a banda 3 apresentou melhor desempenho em relação a X3.

A Tabela 4.18 apresenta alguns trabalhos que utilizaram dados AVHRR (descritos com mais detalhe no capítulo 2) para estimar área de desmatamento, em relação

aos dados Landsat com os respectivos resultados. Esta tabela facilita a comparação com os resultados obtidos por este trabalho.

TABELA 4.18 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O
USO DE IMAGENS AVHRR E LANDSAT EM ESTIMATIVAS DE
DESMATAMENTO EM FLORESTA TROPICAL

Autor Local	NOAA AVHRR	TM/MSS LANDSAT	Resultados comparativos entre dados NOAA e Landsat
(1) RD	3	MSS 5-7	subestimativa de 2 a 18% de área de desmatamento;
(2) RD	IVDN	MSS 5-7	subestimativa 3% - desmatamento;
(2) RD	1-2-3	MSS 5-7	eficiência na diferenciação entre floresta/não floresta diferença de 1% (MSS/AVHRR);
(3) RD	1-2-3	MSS 5-7	exatidão de classificação de 99% com floresta/não floresta, 80% com floresta/outros usos;
(4) África	?	TM/?	superestimativa desmatamento; subestimativa 24% - floresta; $R^2 = 0,68$ (entre TM e AVHRR);
(4) PA	?	TM/?	subestimativa 13% - floresta; $R^2 = 0,93$ (entre TM e AVHRR);
(5) MT	1-2-3	TM/3-4-5	(contato floresta/cerrado) subestimativa desmatamento $R^2 = 0,63$ (entre TM e AVHRR);
(6) RD	3		superestimativa de 20% de área de desmatamento;
(6) PA	3		94% e 80% de precisão de classificação (duas áreas);
(7) MT	4	TM/3-4-5	67% de exatidão média de classificação; correlação = 0,72;

(continua)

Tabela 4.18 - Conclusão

(8) MT	3	TM/3-4-5	subestimativa 6% - floresta; $R^2 = 0,93$; correlação = 0,96;
(8) MT	1-2-3-IVDN	"	superestimativa 5% - floresta; $R^2 = 0,94$; correlação = 0,97.

Referências:

- (1) Woodwell et al., (1986) e (1987);
- (2) Nelson e Holben, (1986);
- (3) Stone et al., (1989);
- (4) Stone e Schlesinger, (1990);
- (5) Santos et al., (1991);
- (6) Cross, (1990);
- (7) Cross, (1991);
- (8) este trabalho.

Observa-se que os resultados deste trabalho, quanto à comparação das estimativas de área obtidas entre dados AVHRR e Landsat são próximos e por vezes superiores aos obtidos na literatura. A variação entre as estimativas pode ser atribuídas a: 1) diferenças de padrão de desmatamento, como as estimativas para Rondônia; 2) diferenças de banda e classificador utilizado para as estimativas AVHRR, como aquelas obtidas entre B3 e X3 neste trabalho; 3) diferenças de resolução do pixel AVHRR utilizado; 4) diferenças na abordagem de comparação com dados Landsat (imagem analógica ou digital). Estas diferenças contudo tornam os resultados deste trabalho significativos, quando comparados com a literatura.

4.2 - SÃO JOSÉ DO XINGU

Assim como para a Serra do Roncador, foi feita uma avaliação estatística comparando classificações AVHRR e TM referentes à região de São José do Xingu, também no Mato Grosso. Conforme exposto na metodologia, item

3.3.9 - Metodologia específica para São José do Xingu, os cálculos foram feitos neste caso apenas para as classificações AVHRR B3 e X3.

A Figura 4.28 ilustra a imagem TM, gerada a partir da interpretação visual, referente à região de São José do Xingu. Conforme a classificação TM, as classes mapeadas foram: floresta, floresta ciliar, floresta secundária, floresta alterada, vegetação pioneira, cerrado, desmatamento e queimada.



Fig. 4.28 - Imagem resultante da interpretação visual de imagem TM/Landsat - São José do Xingu.

Conforme sugerido pelos resultados de classificação obtidos para a região do Roncador, foram feitas as classificações da banda 3 pelo método do

fatiamiento, e das bandas 1,2,3 e IV (X3) AVHRR, utilizando o algoritmo "Maxver" para a região de São José do Xingu.

A Figura 4.29 mostra a sobreposição do dado TM no formato vetorial à classificação AVHRR da banda 3.

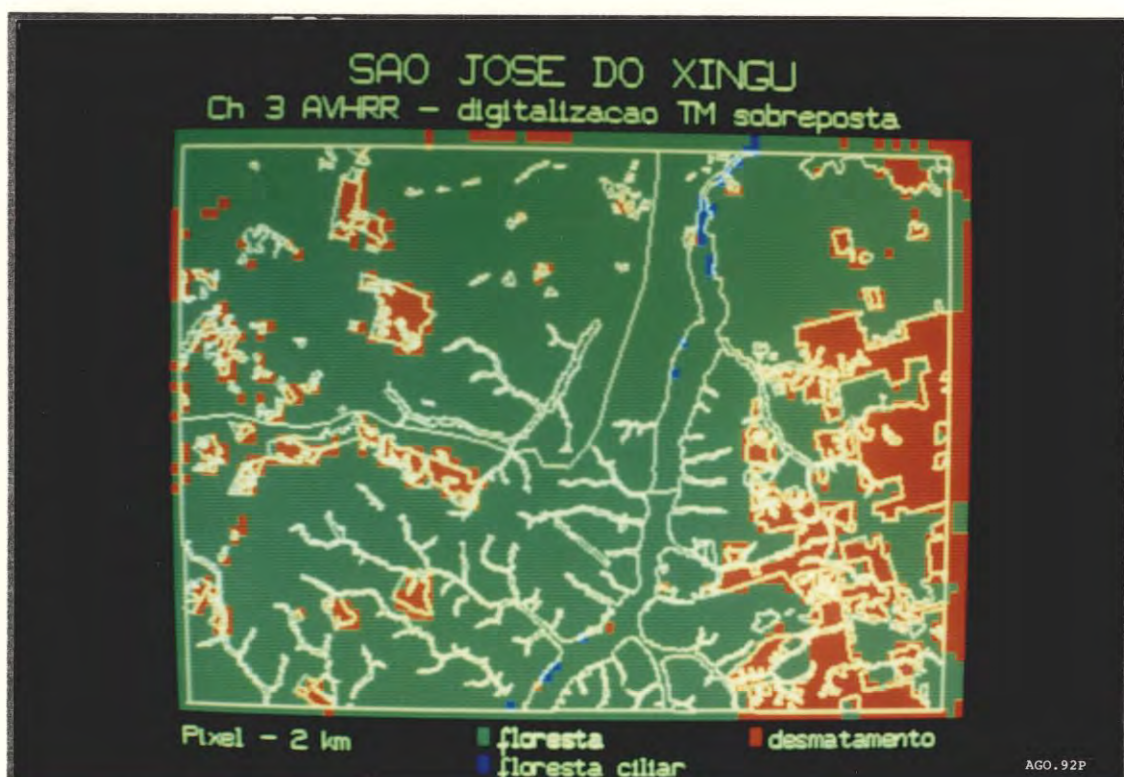


Fig. 4.29 - Imagem classificada B3 AVHRR com digitalização TM sobreposta - região de São José do Xingu.

Observa-se, ao comparar as duas Figuras que as classificações TM e AVHRR apresentaram concordância na delimitação das regiões e que a sobreposição entre os dados foi adequada.

Para as definições de área de floresta, encontrou-se a mesma dificuldade de classificação de imagem AVHRR: áreas de floresta não foram facilmente discriminadas das áreas de floresta ciliar. Da mesma forma que na região

do Roncador áreas de vegetação de galeria foram incorporadas à classe floresta para as avaliações dos dados nesta região.

4.2.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A Tabela 4.19 apresenta os resultados da análise de correlação e regressão linear, considerando a classificação AVHRR da banda 3 (B3) e das bandas 1, 2, 3 e IV (X3), para as classes floresta e desmatamento em relação aos valores de área das mesmas classes definidas na classificação da imagem TM.

TABELA 4.19 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE CORRELAÇÃO E REGRESSÃO LINEAR COM DADOS TM E AVHRR PARA A REGIÃO DE SÃO JOSÉ DO XINGU

	DESMATAMENTO		FLORESTA	
	B3	X3	B3	X3
COEF. CORREL.	0,96	0,98	0,95	0,95
R ²	0,93	0,95	0,90	0,91
ERRO PADRÃO	21,2	13,8	26,5	21,5
F	680,8	1093,5	474,5	500,9

Nesta Tabela observa-se que a correlação entre os dados TM e AVHRR, assim como para a região do Roncador são altas, com valor mínimo de 0,95 de coeficiente de correlação.

A análise de regressão também apresentou resultados favoráveis. Observou-se que para as classes desmatamento e floresta a classificação X3, em comparação à classificação da banda 3, apresentou melhores resultados: coeficientes de determinação superiores, erros padrões inferiores, e valores de F superiores. Desta forma, os resultados repetiram a tendência verificada para as duas composições de bandas para a região da Serra do Roncador. Os valores observados para a banda 3, apesar de inferiores em relação à classificação X3, são significativos para a análise de regressão linear.

Os valores de média e intervalo de confiança dos valores de área das classificações AVHRR, quando comparados aos respectivos valores obtidos para a classificação TM (Tabela 4.20), indicam uma tendência de superestimativa (28%) de áreas desmatadas (65 km²) e subestimativa (3%) de floresta (275 km²) através da banda 3 AVHRR.

A tendência de superestimar os valores de área de desmatamento não é indicada na classificação X3 (média de 52), em relação à média TM (51). Esta classificação apresentou intervalo de confiança mais estreito que a banda 3, para a mesma confiança desejada (95%), o que indica maior precisão para o cálculo da média. Para a classe floresta, esta classificação superestimou a média (291) em 3%, e com intervalo de confiança maior que da banda 3.

TABELA 4.20 - MÉDIA E INTERVALO DE CONFIANÇA DOS VALORES DE ÁREAS (km²) DAS CLASSES EM 54 QUADRÍCULAS PARA A REGIÃO DE SÃO JOSÉ DO XINGU

AVHRR	CLASSES			
	DESMATAMENTO		FLORESTA	
	B3	X3	B3	X3
MÉDIA	65	52	275	291
I.C.	44 a 87	34 a 69	253 a 298	272 a 310
TM				
MÉDIA		51		284
I.C.		33 a 69		266 a 302

I.C. = Intervalo de Confiança (95% de significância)

Estes resultados indicaram o bom desempenho das classificações AVHRR utilizando as combinações B3 e X3, em relação aos dados TM, e a forte relação linear entre os dados, para a classificação de áreas de desmatamento e de floresta, corroborando o verificado para a região do Roncador.

4.2.2 - APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR

A aplicação da equação de regressão obtida para a área da Serra do Roncador na região de São José do Xingu resultou nos erros de estimativa de área das classes floresta e desmatamento apresentados na Tabela 4.21.

TABELA 4.21 - ERROS OBTIDOS NA APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO OBTIDA PARA A REGIÃO DO RONCADOR NA REGIÃO DE SÃO JOSÉ DO XINGU

BANDAS AVHRR	CLASSES			
	DESMATAMENTO		FLORESTA	
	B3	X3	B3	X3
Erro Total	784,5	-10,1	-32,9	427,32
Erro médio	14,5	-0,2	-0,61	7,9
Porcentual	28,7	0,3	0,2	2,8
Erro total = somatória dos erros (estimado - TM) (km ²).				

Erro médio = somatória dos erros / n quadrículas (km²).
 Porcentual = Erro Total / área total TM * 100 (%).

A classificação da banda 3 AVHRR para a estimativa de área da classe floresta, utilizando-se as equações obtidas para a Serra do Roncador, na região de São José do Xingu, apresentou um erro médio de subestimativa de 0,6 km² por quadrícula e um erro total (32,9 km²) equivalente a 0,2% da área de floresta, sendo sua área total equivalente a 14.144,35 km². Para a classificação X3, o erro médio obtido (7,9 km² por quadrícula) e o erro total (2,8%) para a área de floresta foram maiores que os obtidos para a banda 3.

Para a estimativa de área da classe desmatamento, de área total equivalente a 2.735,14 km², obteve-se maiores erros (médio = 14,5 km²; total = 784,5 km² e porcentual = 28,7%) para a classificação da banda 3, quando comparada à classificação com X3 (médio = 0,2 km²; total = 10,1 km² e porcentual = 0,3%). As estimativas originais AVHRR e as

estimativas resultantes da aplicação do modelo são apresentadas no Apêndice C.

Estes dados atestam a utilização da equação obtida para a região do Roncador, sobre a região de São José do Xingu, através da classificação de áreas de floresta com a banda 3, pelo método do fatiamento de níveis de cinza. Esta abordagem resultou em erros de estimativa de área de floresta insignificantes (0,2%), uma vez que ao se aplicar a equação de regressão sobre os próprios valores que a geraram (quadrículas de área de floresta estimada pela banda 3 da região do Roncador), obteve-se erro médio de 15,6 km² por quadrícula, total de 843,4 km² e porcentual de 9,2% para a classe floresta.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho investigou a possibilidade do uso de imagens AVHRR/NOAA como um recurso adicional e inovador em nível nacional para monitoramento das áreas de floresta tropical susceptíveis à ação de desmatamento, utilizando materiais e metodologia atualmente disponíveis no INPE, e de acesso para a comunidade de usuários das técnicas de sensoriamento remoto.

O uso de imagens AVHRR, através das características espectrais das imagens AVHRR verificadas, com resolução espacial igual a 2 x 2 Km, na projeção cilíndrica eqüidistante, indicou a viabilidade de serem distintas as áreas de floresta das áreas de cerrado e desmatamento, devendo-se contudo, considerar suas possíveis fontes de erro.

As relações entre as estimativas de áreas de desmatamento obtidas pela classificação digital de imagens AVHRR/NOAA e aquelas obtidas pela interpretação visual de imagens TM/Landsat, permitiram a verificação de uma relação linear, comprovada na análise de regressão.

A aproximação linear para modelar as relações entre estimativas de áreas de desmatamento e floresta detectadas pelos dois sensores na Serra do Roncador foi considerada satisfatória. Justifica-se esta afirmação por ter-se obtido como resultado um coeficiente de determinação de 0,93, e pela observação dos valores de erro padrão das estimativas (30,7), do coeficiente F (641,5), e a análise de resíduos efetuada (validando os

pressupostos de normalidade, variância constante e aleatoriedade dos resíduos).

Observando o resultados do coeficiente de determinação de 0,95 para a região de São José do Xingu, comprova-se a existência de uma relação linear entre os dados provenientes dos dois sensores - também para esta região.

As áreas sem floresta na Serra do Roncador, detectadas pelo sensor AVHRR foram superestimadas (7% para classificação da banda 1, 2, 3 e IV), ou subestimadas (2% para banda 3), dependendo da classificação executada. O mesmo ocorreu para a detecção de áreas de floresta. Sugere-se o uso da banda 3 para classificação e detecção de desmatamentos, evitando erros maiores que 9% nas estimativas de área. Estes valores percentuais tornam-se muito mais elevados quando as classes de floresta e não floresta são subdivididas. Os resultados da análise da tabulação cruzada, que considera todas as classes discriminadas na interpretação visual TM, indicaram que 30% da área de desmatamento é classificada como floresta pelos dados AVHRR, e que 20% da área de floresta é classificada como cerrado e desmatamento. Estes erros estão associados às confusões entre as classes anteriormente citadas, à dificuldade de classificar os limites irregulares entre elas, aos erros de geometria interna da imagem TM, além da própria dificuldade de classificar áreas de dimensões menores que a resolução do sensor AVHRR.

As classes desmatamento e cerrado não foram diferenciadas adequadamente ao se utilizar imagens AVHRR com o procedimento metodológico descrito. Estas duas classes possuem respostas espectrais muito semelhantes; os valores das médias das classes cerrado e desmatamento para

a banda 3 por exemplo, correspondem a 63 e 53, com variância de 400 e 450 respectivamente.

A correlação entre os valores de área para a classe de desmatamento AVHRR contra desmatamento TM foram próximos a 0,1. Ao se considerar as classes desmatamento e cerrado associadas, a correlação passou a 0,95, em média. Assim sendo, para comparações como as realizadas neste trabalho, é necessário associar as classes desmatamento e cerrado.

Sugere-se para o monitoramento das atividades de desmatamento na região da Amazônia Legal com o uso de imagens AVHRR, a discriminação prévia das áreas de cerrado, e limitação das áreas a serem monitoradas às áreas de ocorrência original de floresta.

As diferentes densidades de cobertura vegetal introduzem erros na classificação de imagens AVHRR. Nas classificações AVHRR testadas, a classe "floresta secundária" foi incluída impropriamente na classe floresta, uma vez que corresponde a áreas que sofreram alterações, e a classe "floresta alterada" na classe desmatamento.

Para a distinção de classes de diferentes densidades de cobertura florestal sugere-se o uso de imagens AVHRR com resolução máxima de 1 km, e a verificação de campo minuciosa para definir a equivalência entre as classes e suas características espectrais.

Para a classificação AVHRR, a combinação das bandas 1, 2, 3 e IV (X3), utilizando o classificador "Maxver" e a banda 3, através de "fatiamiento de níveis de cinza", são as técnicas mais indicadas para classificação de desmatamento e floresta, quando comparadas

estatisticamente aos resultados das estimativas de área das classes a partir das imagens TM/Landsat.

Sugere-se o uso da banda 3, utilizando-se fatiamento de níveis de cinza, uma técnica simples de classificação ao invés da combinação de bandas que, além do tempo computacional para processá-las, introduz a dificuldade do uso do classificador "Maxver" que exigirá uma amostragem muito criteriosa, e conhecimento da região de interesse para treinamento das amostras.

A utilização de imagem TM/Landsat em papel fotográfico implicou em um erro médio de geometria dos dados da ordem de 125 m no eixo Y e 800 m no eixo X, proveniente do remapeamento dos dados para uma projeção cartográfica através do procedimento de calibração da mesa digitalizadora, contra 101 m no eixo Y e 65 m no eixo X de erro observados na imagem digital, ambas comparadas à carta topográfica.

Para atenuação destes erros sugere-se o uso de imagens TM no formato digital para comparações entre sensores como a pretendida neste trabalho. Desta forma anular-se-iam também as diferenças provenientes entre as abordagens de classificação digital e de interpretação visual de imagens.

O uso do sistema SITIM, para classificação digital de imagens, e SGI para integração dos dados dos sensores TM e AVHRR, possibilitaram o desenvolvimento da metodologia piloto apresentada e a avaliação dos erros de classificação presentes nas imagens AVHRR.

A equação do modelo linear obtida para os valores de área estimados pelos sensores TM e AVHRR para a

região da Serra do Roncador, ao ser aplicada para a classificação AVHRR referente à região de São José do Xingu, apresentou erros médios e percentuais insignificantes para as estimativa de floresta (0,6% e 0,2% para a banda 3; 7,9% e 2,8% para X3). Estimativas de desmatamento, utilizando a equação de regressão apresentaram erros superiores para a banda 3 (14,5% e 28,7%) quando comparada à classificação com as bandas 1, 2, 3 e IV (0,2% e 0,3%).

A facilidade de classificação e ausência de erros significativos para a estimativa de área de floresta com a banda 3, sugerem a utilização da equação de regressão obtida para monitorar desmatamentos em áreas florestais. O monitoramento destas áreas desmatadas seria obtido através das diferenças de alteração na cobertura florestal verificadas entre imagens AVHRR de datas distintas.

Sugere-se a repetição destes testes de calibração dos dados AVHRR para outras áreas a fim de se verificar as possíveis variações dos erros.

Para continuidade deste trabalho recomenda-se a extensão deste estudo para áreas de desmatamento onde o padrão seja diferente daquele resultante dos projetos agropecuários de médio e grande porte. Áreas de desmatamento do tipo "espinha-de-peixe" e de padrões intermediários devem ser analisadas para que relações específicas para estes padrões sejam obtidas. Desta forma, todas as possíveis diferenças de desempenho da classificação de imagens AVHRR para detectar degradações da cobertura florestal seriam abrangidas e as relações com dados TM estabelecidas.

Este trabalho, ao propor metodologia e descrever erros do uso de imagens AVHRR/NOAA para detecção de desmatamentos na floresta amazônica, propiciou o desenvolvimento inicial de um sistema de monitoramento em tempo real, rápido, simples e de relativo baixo custo, tendo imagens AVHRR como fonte de dados, e dados TM como fator de calibração e detalhamento das estimativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, H.; Santos, J.R. dos Estudo da vegetação de cerrado na área do Distrito Federal, a partir de dados orbitais. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - São José dos Campos, INPE, 1980. 152 p. (INPE - 1730 - TDL/1026).
- Alves, D.S.; Meira-Filho, L. G.; D'Alge, J.C.L.; Mello, E.K.; Moreira, J.C.; de Medeiros, J.S. The Amazonia Information System. In: ISPRS, Congress 17., Washington, DC, Aug. 2-14, Commission VI, 1992.
- Baumgardner, M.F.; Kristof, S.J.; Johannsen, C.J.; Zachary, A.L. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. Proceedings of Indiana Academy of Science, 79:413-422, 1970.
- Blair, B.O.; Baumgardner, M.F. Detection of green and brown wave in hardwood canopy covers using multirate multispectral data from Landsat - I. Agronomy Journal, 69(5):808 - 811, 1977.
- Bowers, S.A.; Hanks, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. Soil Science, 100(2):130-138, 1965.
- Chen, S.C.; Shimabukuro, Y.E. Dados AVHRR-NOAA para monitoramento da cobertura vegetal da região Amazônica. In: Latin American Symposium on Remote Sensing, 5., Cuzco, Peru, 28 Out - 1 Nov., 1991. Annals. Selper, 1991, p. 941 - 949.
- Costa Neto, P.L. de O. Estatística. São Paulo, Edgard Blucher, 1977. 264 p.
- Cross, A. AVHRR as a data source for a GIS: deforestation in Amazonia. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, DC, May 20 - 24, 1990. Proceedings. 1990, p. 223 -226.
- Cross, A. Tropical forest monitoring using AVHRR: towards an automated system for change detection: final report. Geneva, Natural Environment Council, Aug. 1991. 44 p.

Eliañ, S.N. Análise de regressão. São Paulo, USP - Instituto de Matemática e Estatística, 1988. 230 p.

ENGESPAÇO Sensoriamento remoto, SITIM-150: manual do usuário. São José dos Campos, 1988.

SITIM-150. Sistema Geográfico de Informações: manual de referência do usuário. São José dos Campos, 1990. Versão 2.1.

Fearnside, P. M. Deforestation in the Brazilian Amazon: how fast is it occurring?. Interiência, 7(2):82-88, 1982.

Spatial Concentration of deforestation in the Brazilian Amazon. Ambio, 5(2):74-81, 1986.

Figueiredo, D.C. Sistema de obtenção de índice de vegetação para a América do Sul por processamento digital de imagens NOAA/AVHRR. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1990. 107 p. (INPE - 5068 - TDL/407).

Freden, S.C.; Gordon JR., F. Landsat satellites. In: American Society of Photogrametry (ASP) Manual of remote sensing. 2 ed. Falls Church, 1983. p. 517-570.

Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC) Monitoramento da cobertura florestal do estado do Acre: desmatamento e uso atual da terra. Rio Branco, 1990. 214 p.

Gates, D.M. Physical and physiological properties of plants. In: National Academy of Sciences. Remote sensing with special reference to agricultural and forestry. Washington, 1970.

Gentry, A.H. Deforestation and increased flooding of the upper Amazon. Science, 210(19):1354-1356, 1980.

Gervin, J.C.; Kerber, A.G.; Witt, R.G.; Lu, Y.C.; Sekhon, R. Comparison of level I land cover classification accuracy for MSS and AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 6(1):47-57, 1985.

Goldemberg, J. Amazônia and the greenhouse effect In: Meeting Amazônia: Facts, Problems and Solutions, São Paulo, Brasil. July 31 - Aug 2, 1989. Annals. São José dos Campos, INPE, 1989, v.1, p. 13 - 19.

Goldemberg, J.; Barbosa, M.N. Amazônia: to destroy or preserve? In: Meeting Amazônia: Facts, Problems and Solutions, São Paulo, Brasil. July 31 - Aug 2, 1989. Annals. São José dos Campos, INPE, 1989, v.1, p. 1-13.

Goward, S.N.; Tucker, C.J.; Dye, D.G. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer. Vegetatio, 64(1):3-14, 1985.

Grant, L. Difuse and specular characteristics of leaf reflectance. Remote Sensing of Environment, 22(2):309-322, 1987.

Hayes, L. The current use of TIROS-N series of meteorological satellites for land-cover studies. International Journal of Remote Sensing, 6(1):3-45, 1985.

Hoffer, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to Remote Sensor data. In: Swain, P.H.; Davis, S.M., ed. Remote sensing: the quantitative approach. Indiana, McGraw-Hill, 1978. p.227-289.

Holben, B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 7(11):1417-1434, 1986.

Holben, B.N.; Fraser, R.S. Red and near-infrared sensor response to off-nadir viewing. International Journal of Remote Sensing, 5(1):145-160, 1984.

Holben, B.; Tucker, C.J.; Fan, C.J. Assessing soybean leaf area and leaf biomass with spectral data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 46:651-656, 1980.

Horler, D.N.H.; Ahern, F.J. Forestry information content of Thematic Mapper data. International Journal of Remote Sensing, 7(3):405-428, 1986.

Ii, S.S. Programa para criar arquivo de referenciais para imagem codificada. São José dos Campos, INPE. 1988. Programa de computador.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF) Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia Brasileira: resenha geral. Brasília, 1988, 81 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) Cachimbo - Brasil - WAC 3069: 1:1.000.000. 1976

Cana-Brava. Folha SC. 22-Y-D-II; MI-1765:
1:100.000. Rio de Janeiro, 1986a.

Córrego Santo Luzia. Folha SC 22-Y-D-II; MI-1764:
1:100.000. Rio de Janeiro, 1986b.

Mapa de vegetação do Brasil. 1:5.000.000. Rio de Janeiro, 1988.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Atlas de Alteração da Cobertura Florestal da Amazônia Legal: 196 cartas topográficas e 196 cartas temáticas, 1989.

Deforestation in Brazilian Amazônia. São José dos Campos, INPE. 1992. 4 p.

Jackson, R.D. Spectral indices in n-space: Remote Sensing of Environment, 13:409-421, 1983.

- Joyce, A.T.; Sader, S.A. The use of remotely sensed data for the monitoring of forest change in tropical area. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 20., Nairobi, Kenya, 4-10 Dec, 1986. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1986, p. 4-10.
- Kauth, R.J.; Thomas, G.S. The tasseled-cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Symposium of Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, IN, 1976. Proceedings. West Lafayette, IN, Purdue University, 1976, p. 4B41-4B51.
- Kidwell, K.B. NOAA polar orbiter data (Tiros-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8 and NOAA-9) users guide. Washington, NOAA/NESS, 1991. 1v.
- Kirchhoff, V.W.J.H. Biomass burning in Amazonia: production of CO₂, CO and O₃ and its global impact. In: Meeting Amazônia: Facts, Problems and Solutions, São Paulo, Brasil. July 31 - Aug. 2, 1989. Annals. São José dos Campos, INPE, 1989, v.1, p. 241 - 264.
- Knipling, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. Remote Sensing of Environment, 1(3):155-159, 1970.
- Koppen, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la Tierra. Versión de Pedro R. Hendrichs. México. Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.
- Laporte, N. Etude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale: utilisation de données satellitaires NOAA AVHRR sur l'Afrique de l'ouest (Thèse du Doctorat) - l'Université Paul Sabatier, Toulouse, Oct. 1990. 231 p.
- Lillesand, T.M.; Kieffer, R.W.; Remote sensing and image interpretation. New York, John Wiley & Sons, 1979. 612 p.

Malingreau, J.P.; Laporte, N. Global monitoring of tropical deforestation. AVHRR observations over the Amazon Basin and West Africa. Forest Signatures Workshop, Joint Research Center, ISPRA. Sept. 7-9, 1988.

Malingreau, J.P.; Tucker, C.J. The contribution of AVHRR data for measuring and understanding global process: large-scale deforestation in the Amazon Basin. In: IGARSS'87 - International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Ann Arbor, MI, May 18-21, 1987. Proceedings. New York, NY, IEEE, 1987. p.443-448.

_____. Large-scale deforestation in the Southeastern Amazon Basin of Brazil. Ambio, 17(1):49-55, 1988.

Markhan, B.L.; Townshend, J.R.G. Land cover classification as a function of sensor spatial resolution. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15., Ann Arbor, MI, 11-15 May 1981. Proceedings. Ann Arbor, ERIM, 1981. v.3, p. 1075-1089.

Mascarenhas, N.D.A.; Velasco, F.R.D. Processamento digital de imagens. São Paulo, Instituto de Matemática e Estatística da Universidade Estadual de São Paulo, 1984. 2v. IV Escola de Computação, São Paulo, 12 a 20 de julho de 1984.

Medeiros, J.S.; Dias, R.W.O.; Toledo, F.L.; Sano, E.E. Mapeamento de projetos agropecuários. Belém, SUDAM. Centro de Sensoriamento Remoto da Amazônia, 1988. 46p.

Molion, L.C.B. Deforestation of the Amazonas jungle and effects on climate. São José dos Campos, INPE, 1978 (INPE-1391-PE/183).

Montgomery, D.C.; Peck, E.A. Introduction to linear regression analysis. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.

Myers, N. Tropical deforestation and remote sensing. Forest Ecology and Management, 23:215-225, 1988.

Myers, V. Soil, water and plant relations. In: National Academy of Sciences. Remote sensing with special reference to agricultural and forestry. Washington, National Academy of Ciencias, 1970. p. 253-297.

NASA Data user handbook - ERTS. Baltimore, Goddard Space Flight Center, 1972.

Nelson, R.; Holben, B. Identifying deforestation in Brazil using multiresolution satellite data. International Journal of Remote Sensing, 7(3):429-448, 1986.

Nelson, R.; Horning, N.; Stone, T.A. Determining the rate of forest conversion in Mato Grosso, Brazil, using Landsat MSS and AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 8(12):1767-1785, 1987.

Nelson, R.F.; Latty, R.S.; Mott, G. Classifying northern forest using Thematic Mapper Simulator data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 50(5):607-617, 1984.

Pereira, M.C.; Setzer, A.W. Spectral characterization of forest fires in NOAA/AVHRR images. Accepted for publication in International Journal of Remote Sensing, Jan. 1992.

Projeto Radam-Brasil. Programa de integração nacional. Rio de Janeiro, MME/SG, 1981. 524 p. (Levantamento de Recursos Naturais, v.22)

Reid, W.V. How many species will be there? In: Sayer, J.; Whitmore, T. ed. Tropical deforestation and species extinction. London, Chapman and Hall. In press.

Reis, E.J.; Margulis, S. Perspectivas econômicas do desflorestamento da Amazônia: texto para discussão. Brasília, IPEA, , 1991. 40 p. n° 215.

Richards, J.A. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Berlin, Springer-Verlag, 1986. 281 p.

- Richardson, R.D.; Wiegand, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43:1541-1552, 1977.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Deering, D.W.; Schell, J.A. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Austin, Remote Sensing Center, Texas A & M University, College Station, 1974. (final report RSC 1978 - 4).
- Sader, S.A. Analysis of effective radiant temperature in a Pacific Northwest forest using thermal infrared Multispectral Scanner data. Remote Sensing of Environment, 19:105-115, 1986.
- Sader, S.A.; Stone, T.A.; Joyce, A.T. Remote Sensing of Tropical Forests: An overview of research and applications using non-photographic sensors. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56(10):1343-1351, 1990.
- Sader, S.A.; Waide, R.B.; Lawrence, W.T.; Joyce, A.T. Tropical forest biomass and Successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 28(2):143-156, 1989.
- Sadowski, F.G.; Malila, W.A.; Sarno, J.E.; Nalepka, R.F. The influence of multispectral scanner spatial resolution on forest feature classification In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 12., Ann Arbor, MI, 25 - 29 Apr. 1987. Proceedings. Ann Arbor, ERIM, 1977, v.2 p. 1279-1285.
- Santos, A.P.; Assunção, G.V.; Santos Filho, C.P. Relatório das atividades do projeto IBDF/INPE (Sub-Projeto Desmatamento) durante o ano de 1978. São José dos Campos, INPE, 1979b. 133 p. (INPE-1428-RPE/007).
- Santos, A.P.; Novo, E.M.L.M. Uso de dados do Landsat-1 na implantação, controle e acompanhamento de projetos agropecuários no sudoeste da Amazônia Legal. (Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) - Instituto de Pesquisas Espaciais, 1977. 183 p. (INPE-1044-TPT/056)

- Santos, J.R. dos; Lee, D.C.L.; Shimabukuro, Y.E. Análise relacional de dados AVHRR/NOAA e TM/Landsat na avaliação do antropismo em região de contato floresta/savana. In: Latin American Symposium on Remote Sensing, V, Cuzco, Peru, 28 Out - 1 Nov., 1991, Annals. Selper, 1991, p. 941-949.
- Schwalb, A. The TIROS-N/NOAA-A-G satellites series. Washington, DC, NOAA, 1978. (NOAA Technical Memorandum NESS 95).
- Sedjo, R.A. The global carbon cycle - are forest the missing sink ? Journal of Forestry, 88(10):33-34, 1990.
- Setzer, A.W.; Fernandes, A.E.; Pereira, M.C. Manual do sistema de detecção de queimadas. São José dos Campos, INPE in press.
- Setzer, A.W.; Pereira, M.C.; Pereira Jr, A.C; Almeida, S.A.O. Relatório de atividades do Projeto IBDF-INPE "SEQUE" - ano 1987. -São José dos Campos, INPE, 1988. 101 p. (INPE - 4534 -RPE/565).
- Simonett, D.S. The development and principles of remote sensing. In: American Society of Photogrametry (ASP). Manual of remote sensing, 2 ed., Falls Church, 1983. v.1, p.1-36.
- Sioli, H. The effects of deforestation in Amazonia. The Ecologist, 17(4-5):134-138, 1987.
- Skole, D.L.; Chomentowski, W.H.; Nobre, C. New estimates of Amazonian deforestation rates in the late 1970s using a geographic information system. s.l., s. ed., Aug. 1990.
- Skula, J.; Nobre, C.; Sellers, P. Amazon Deforestation and Climate Change. Science, 247(4948):1322-1325, 1990.
- Smith, N.J.H. Colonization lessons from a tropical forest. Science, 214(4522):755-761, 1981.

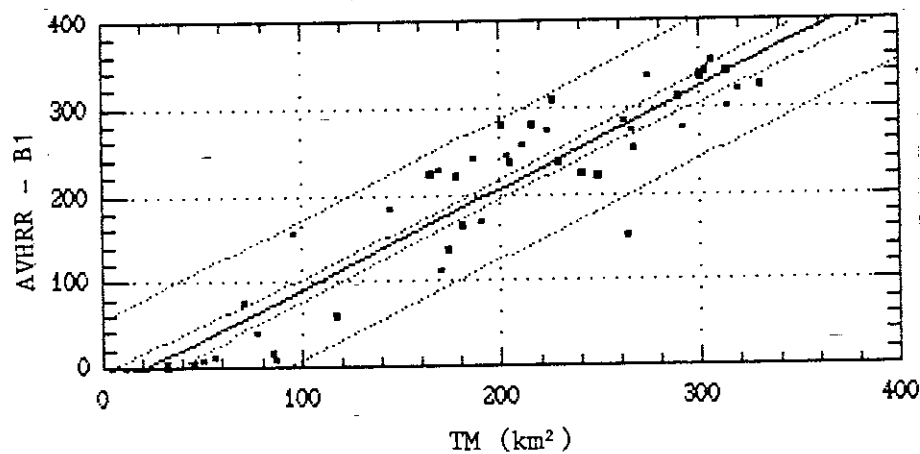
- Stone, T.A.; Schlesinger, P. Monitoring deforestation in the tropics with NOAA AVHRR and LANDSAT data. In: International Symposium on Primary Data Acquisition. Proceedings. Manaus ISPRS, 1990, vol. 28, part 1, p. 197-202.
- Stone, T.A.; Brown, I.F.; Woodwell, G.M. Estimates of land use change in central Rondonia, Brazil by Remote Sensing. Submitted to Journal of Forest Ecology and Management in 1989.
- Swain, P.H.; King, R.C. Two effects features selection criteria for multispectral remote sensing. Lafayette, Purdue University. Laboratory for Applications of Remote Sensing, 1973. (LARS Information Note 042673)
- Tardin, A.T.; Cunha, R.P. Avaliação da alteração da Cobertura Florestal na Amazônia Legal utilizando Sensoriamento Remoto Orbital. São José dos Campos, INPE, 1989, 30 p. (INPE-5010-RPE/607).
- Tardin, A.T.; Lee, D.C.L.; Santos, R.J.R.; Assis, O.R.; Barbosa, M.P.S.; Moreira, M.L.; Pereira, M.T.; Silva, D.; Santos Filho, C.P. Subprojeto desmatamento: convênio IBDF/CNPq - INPE. São José dos Campos, INPE, 1980, 49 p. (INPE-1649-RPE/103).
- Tardin, A.T.; Santos, J.R.; Meira Filho, L.G. Estado de desflorestamento da floresta amazônica brasileira em 1989. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 24-29 Jun. 1990. 16 p., manuscrito.
- Tarpley, J.D.; Schneider, S.R.; Money, R.L. Global Vegetation Indices from the NOAA-7 meteorological satellite. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23:491-494, Mar. 1984.
- Tavares, V.P.; Considera, C.M.; Cartro e Silva, M.T.L.L. de. Colonização dirigida no Brasil: suas possibilidades na região Amazônica. Rio de Janeiro, IPEA/INPES, 1972. 202 p. (IPEA Relatório de Pesquisa, 8).
- The World Research Institute World resources 1990-91. Oxford, Oxford University Press, 1990. 383 p.

- The World Research Institute World resources 1992-93.
Oxford, Oxford University Press, 1992. 385 p.
- Townshend, J.R.G. The spatial resolving power of earth resources satellites: a review. Maryland, Goddard Space Flight Center, 1980. (NASA TM 82020).
- Townshend, J.R.G.; Justice, C.O. Selecting the spatial resolution required for global monitoring of land transformations. International Journal of Remote Sensing, 9(2):187-236, 1988.
- Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8:127-150, 1979.
- Tucker, C.J.; Holben, B.N.; Goff, T.E. Intensive forest clearing in Rondonia, Brazil, as detected by satellite remote sensing. Remote Sensing of Environment, 15:255-261, 1984.
- Uhl, C.; Buschbacher, R.; Serrão, A.E. Abandoned pastures in Eastern Amazônia. I. Patterns of plant succession. Journal of Ecology, 76:663-681, 1988.
- Woodwell, G.M. The carbon dioxide problem. In: _____ - The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurement by remote sensing. New York, John Wiley, 1984. p. 3-15.
- Woodwell, G.M.; Houghton, R.A.; Stone, T.A.; Park, A.B. Changes in the area of forests in Rondonia, Amazon Basin, measured by satellite imagery. In: Trabalka, J.R.; Reichle, D.E. ed. A global analysis. New York, Springer - Verlag, 1986. p. 243-257.
- Woodwell, G.M.; Houghton, R.A.; Stone, T.A.; Nelson, R.F.; Kovalick, W. Deforestation in the tropics: new measurements in the Amazon Basin using Landsat and NOAA Very High Resolution Radiometer imagery. Journal of Geophysical Research, 92 (D2):2157-2163, 1987.

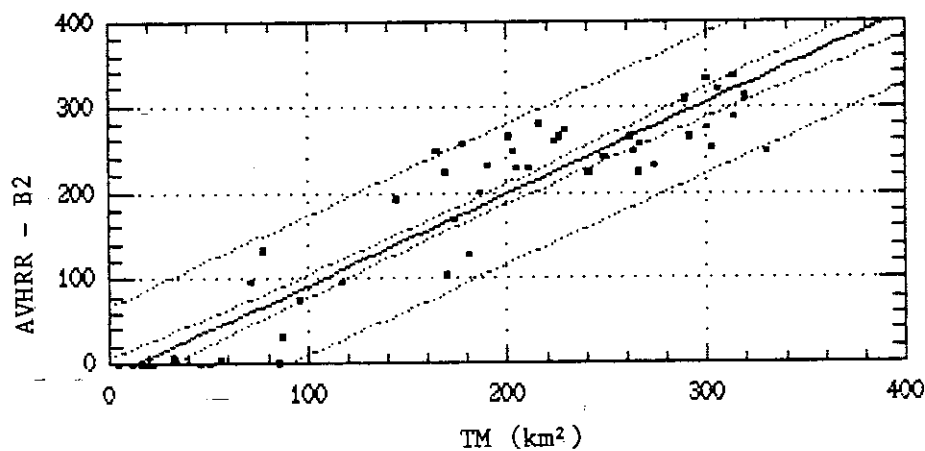
Yokomizo, C. Financial and fiscal incentives in the Amazon: facts, problems and solutions In: Meeting Amazônia: Facts, Problems and Solutions, São Paulo, Brasil. July 31 - Aug 2, 1989. Annals. São José dos Campos, INPE, 1989, v.1, p. 58 - 104.

APÊNDICE A

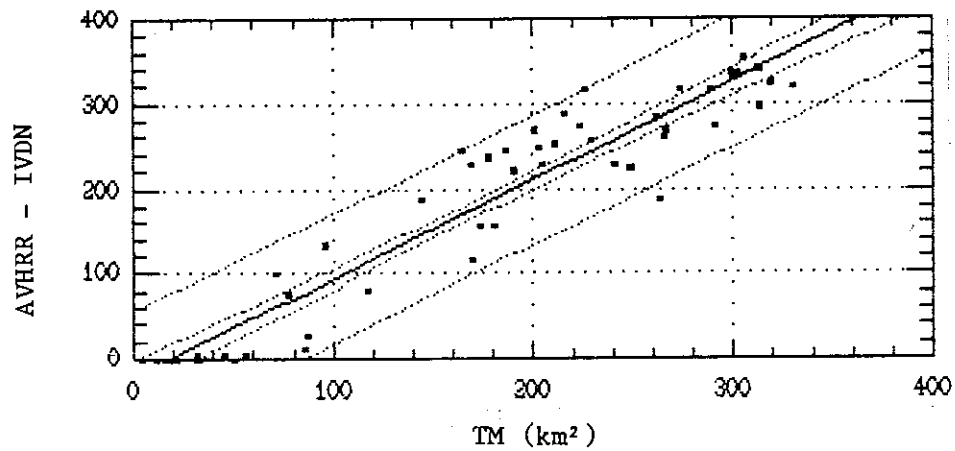
REGRESSÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA OBTIDAS COM DADOS TM
E AS COMBINAÇÕES DE BANDAS AVHRR UTILIZADAS PARA FLORESTA E
DESMATAMENTO + CERRADO



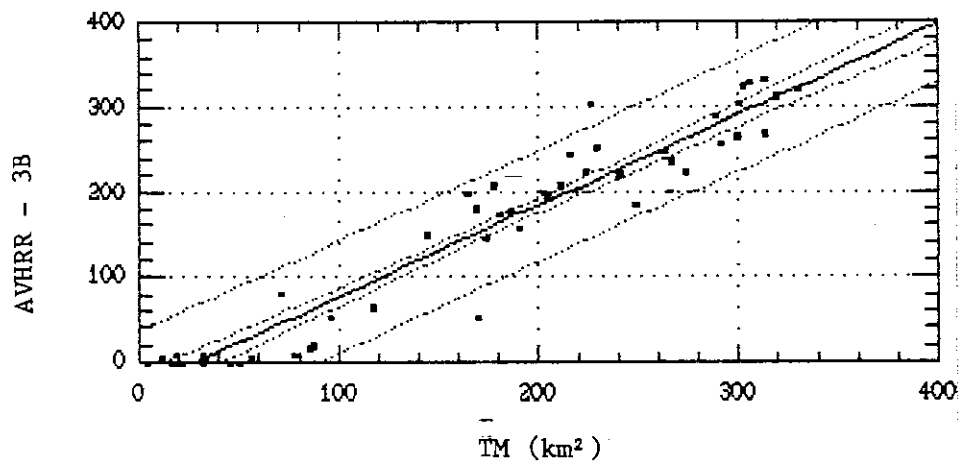
A1 - Regressão entre área de floresta estimada pelas classificações B1 e TM.



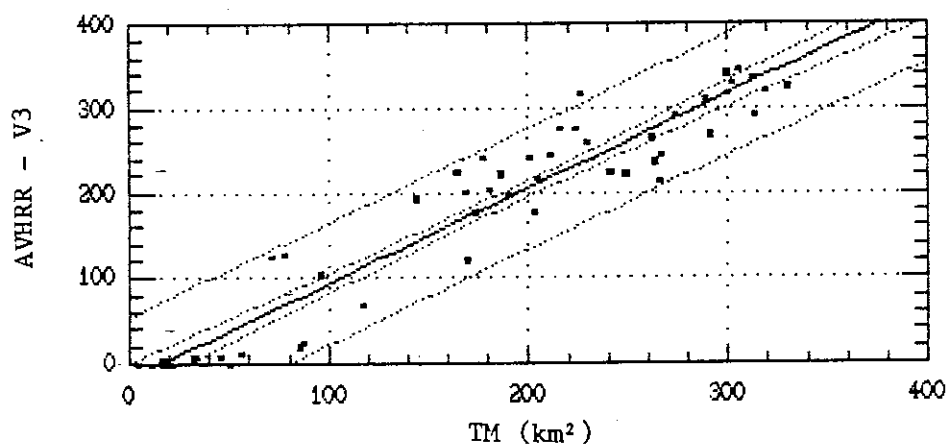
A2 - Regressão entre área de floresta estimada pelas classificações B2 e TM.



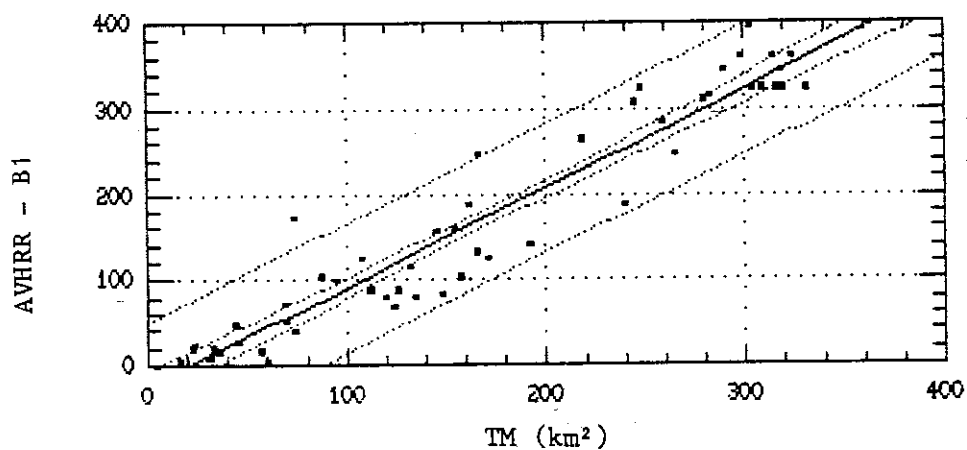
A3 - Regressão entre área de floresta estimada pelas classificações IV e TM.



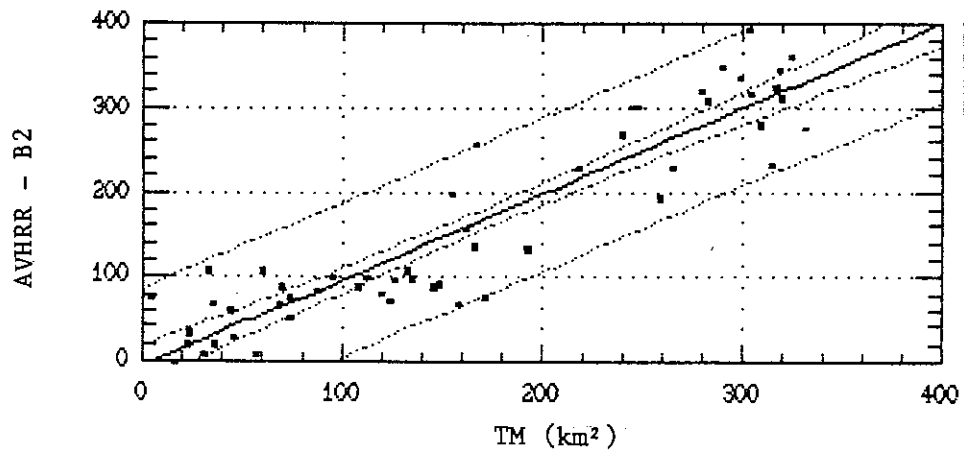
A4 - Regressão entre área de floresta estimada pelas classificações 3B e TM.



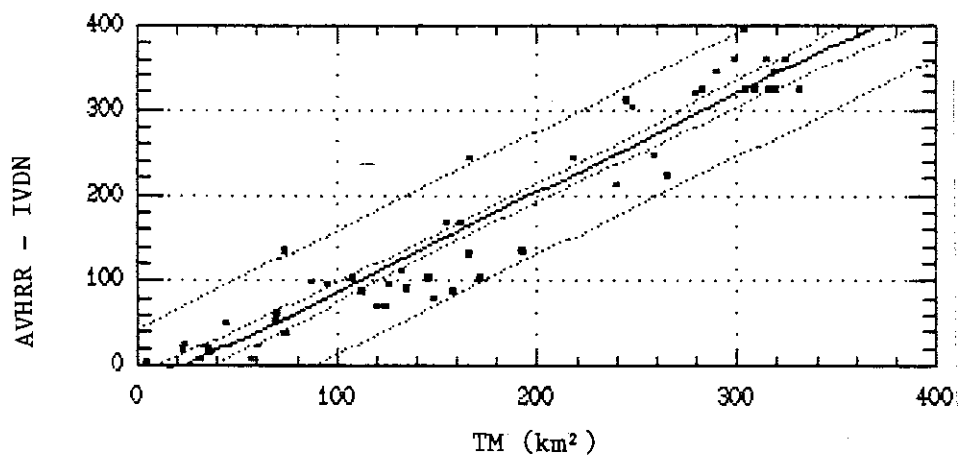
A5 - Regressão entre área de floresta estimada pelas classificações V3 e TM.



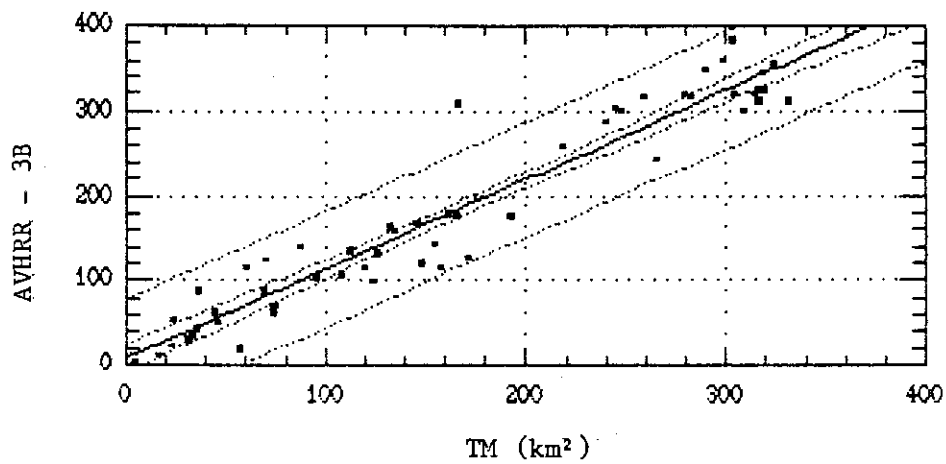
A6 - Regressão entre área de desmatamento + cerrado estimada pelas classificações B1 e TM.



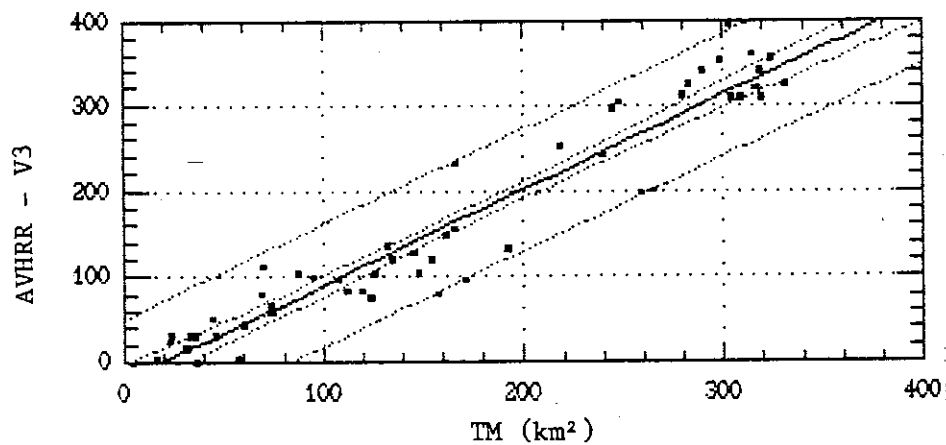
A7 - Regressão entre área de desmatamento + cerrado estimada pelas classificações B2 e TM.



A8 - Regressão entre área de desmatamento + cerrado estimada pelas classificações IV e TM.



A9 - Regressão entre área de desmatamento + cerrado estimada pelas classificações 3B e TM.



A10 - Regressão entre área de desmatamento + cerrado estimada pelas classificações V3 e TM.

APÊNDICE B

ÁREA ESTIMADA PELO TM E PELAS COMBINAÇÕES DE BANDAS AVHRR
(km²), POR UNIDADE AMOSTRAL, PARA A SERRA DO RONCADOR

B.1 - CLASSE DESMATAMENTO + CERRADO

QUADRICU	TM C+D	AVHRR B1	AVHRR B2	AVHRR B3	AVHRR 3B	AVHRR IVDN	AVHRR V3	AVHRR X3
1	171,1404	224	76	128	128	104	96	132
2	73,3356	152	76	56	64	136	68	68
3	107,5068	236	38	88	108	104	96	108
4	259,1352	40	192	212	316	248	196	288
5	264,8916	76	228	196	244	224	200	232
6	318,7296	0	344	316	344	344	340	344
7	298,6884	0	336	304	360	360	352	352
8	304,3728	0	316	264	320	324	308	312
9	309,186	0	280	284	300	324	308	324
10	69,696	272	88	108	124	64	112	120
11	126,1232	236	96	116	132	96	104	124
12	31,068	352	8	24	32	8	16	28
13	192,4524	184	132	148	176	136	132	156
14	158,1984	220	68	92	116	88	80	100
15	161,9496	136	156	140	180	168	148	172
16	289,908	4	348	332	348	344	340	344
17	154,7604	164	196	92	144	168	120	136
18	244,4292	16	300	256	304	312	296	308
19	69,0876	252	68	84	88	56	80	84
20	145,5516	168	88	144	168	104	128	152
21	119,8548	280	80	100	116	72	84	96
22	56,862	308	8	8	20	8	4	8
23	16,4736	320	0	8	12	0	4	8
24	36,162	336	20	16	88	16	1	20
25	166,3524	112	256	252	308	244	232	264
26	279,7704	12	320	296	320	320	312	320
27	282,834	8	308	304	316	324	324	312
28	44,1936	276	60	44	64	52	52	56
29	95,0292	224	100	88	104	96	100	100
30	132,516	244	108	152	164	112	136	152
31	74,0268	284	52	68	72	40	60	68
32	23,3496	300	32	36	56	28	32	36
33	87,12	220	84	112	140	100	104	112
34	218,5272	60	336	256	260	244	252	268
35	319,4208	0	312	304	324	324	308	324
36	316,1952	0	324	292	324	324	320	324
37	33,1992	340	108	40	36	24	32	48
38	35,7732	332	68	32	44	20	32	48
39	22,7232	340	20	20	24	20	24	28
40	134,8596	280	98	140	160	92	120	140
41	165,726	228	136	168	176	132	156	168
42	112,194	272	100	96	136	88	84	100
43	303,6024	4	392	368	384	396	396	392
44	324,18	0	360	344	356	360	356	360
45	314,2116	0	232	320	320	360	360	360
46	4,6332	324	76	0	4	4	0	12
47	60,1776	336	108	64	116	24	44	76
48	239,4792	156	268	248	288	212	240	260
49	148,554	240	92	108	120	80	104	124
50	124,0452	256	72	96	100	72	76	92
51	45,558	312	28	40	52	24	32	36
52	247,77	8	300	276	300	304	304	304
53	316,4652	0	324	292	312	324	320	248
54	331,4412	0	276	304	312	324	324	324
SOMA	8983,491	9144	8942	8676	9924	3876	8849	9472
MEDIA	166,3609	169,3333	165,5926	160,6667	183,7778	164,3704	163,8704	175,4074

B.2 - CLASSE FLORESTA

\	TM	AVHRR	AVHRR	AVHRR	AVHRR	AVHRR	AVHRR	AVHRR
QUADRICUL	FlorIM	FlorB1	FlorB2	FlorB3	FlorIVDN	Flor3B	FlorV3	FlorX3
1	165	224	248	220	244	196	224	216
2	264	152	248	264	188	248	236	252
3	229	236	272	272	256	252	260	248
4	78	40	132	112	76	8	128	36
5	71	76	96	128	100	80	124	92
6	17	0	0	28	0	0	0	0
7	32	0	4	56	0	0	4	0
8	33	0	4	60	0	4	8	4
9	18	0	0	40	0	0	4	0
10	266	272	224	216	260	200	212	196
11	205	236	228	208	228	192	216	200
12	306	352	320	336	352	328	344	332
13	145	184	192	176	188	148	192	168
14	178	220	256	232	236	208	240	224
15	174	136	168	184	156	144	176	152
16	46	4	0	16	4	0	8	4
17	181	164	128	228	156	172	204	184
18	86	16	1	68	12	16	20	16
19	267	252	256	240	0	236	244	236
20	190	168	232	180	220	156	196	172
21	216	280	280	260	288	244	276	264
22	226	308	264	308	316	304	316	304
23	319	320	312	316	324	312	320	316
24	300	336	332	336	336	264	340	332
25	170	112	104	108	116	52	120	96
26	56	12	4	28	4	4	12	4
27	51	8	0	20	0	0	0	0
28	292	276	264	280	272	256	268	264
29	241	224	224	236	228	220	224	224
30	203	244	248	208	248	196	176	200
31	262	284	264	256	284	248	264	252
32	314	300	288	288	296	268	292	288
33	249	220	240	212	224	184	220	212
34	117	60	96	68	80	64	68	56
35	17	0	0	20	0	0	4	0
36	20	0	0	32	0	0	0	0
37	303	340	252	320	336	324	328	312
38	300	332	276	308	328	304	316	296
39	313	340	336	336	340	332	336	332
40	201	280	264	220	268	200	240	220
41	169	228	224	192	228	180	200	152
42	224	272	260	264	272	224	276	260
43	32	4	8	32	4	8	4	4
44	12	0	0	16	0	4	0	0
45	22	0	0	40	0	0	0	0
46	330	324	248	324	320	320	324	312
47	274	336	232	276	316	224	292	264
48	96	156	76	78	132	52	104	80
49	187	240	200	216	244	176	220	172
50	211	256	228	228	252	208	244	220
51	289	312	308	300	316	288	308	300
52	87	8	32	56	28	20	24	12
53	19	0	0	32	0	8	0	0
54	4	0	0	20	0	0	0	0
SOMA	9077	9144	8873	9498	9076	8076	9156	8480
MEDIA	168	169	164	176	168	150	170	157

APÊNDICE C

ÁREA ESTIMADA PELO AVHRR, COMBINAÇÕES X3 E B3 (km²), E
RESULTANTE DA APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR, POR UNIDADE
AMOSTRAL, PARA SÃO JOSÉ DO XINGU

FlorX3	FlorMod	FlorIM	DesmtX3	DesmMod	DesmIM	FlorB3	FlorMod	FlorIM	DesmB3	-DesmMod	DesmIM
324	320,5	325,3	0	-6,6	1,8	324	332,0	325,3	0	-6,6	1,8
288	286,9	272,0	72	72,6	62,6	288	287,9	272,0	80	73,5	62,6
312	315,3	302,1	12	6,6	31,6	300	307,9	302,1	20	13,4	31,6
324	328,5	325,6	0	-6,6	0,0	320	328,0	325,6	4	-2,6	0,0
332	327,4	324,5	0	-6,6	0,0	328	336,0	324,5	4	-2,6	0,0
348	355,0	315,3	12	6,6	0,0	332	340,0	304,9	8	1,4	0,0
316	319,7	329,1	8	2,2	3,5	292	299,9	297,5	8	1,4	3,5
344	350,6	304,3	16	11,0	11,1	328	336,0	304,3	32	25,4	11,1
276	275,7	235,2	40	46,2	9,1	292	299,9	235,2	12	5,4	9,1
304	306,5	296,6	56	55,0	20,6	312	320,0	296,6	48	41,4	20,6
380	390,2	331,0	20	15,4	8,7	304	392,0	331,0	16	9,4	8,7
240	236,1	228,7	120	125,4	113,3	284	211,8	228,7	152	145,5	113,3
360	360,2	335,0	0	-6,6	0,0	360	368,0	335,0	0	-6,6	0,0
348	355,0	333,2	12	6,6	0,0	352	360,0	326,0	8	1,4	0,0
400	412,2	337,0	0	-6,6	0,0	340	348,0	300,7	0	-6,6	0,0
360	368,2	340,4	0	-6,6	0,0	296	303,9	265,3	0	-6,6	0,0
320	324,1	275,2	80	81,4	76,1	264	271,9	275,2	136	129,5	76,1
280	280,1	251,6	80	81,4	72,0	260	267,9	251,6	100	93,5	72,0
272	271,3	200,0	52	50,6	55,8	264	271,9	280,0	40	53,4	55,8
336	341,8	314,0	24	19,8	23,0	324	332,0	314,0	32	25,4	23,0
312	315,3	315,6	12	6,6	27,2	308	316,0	296,9	16	9,4	27,2
324	329,5	334,9	0	-6,6	0,0	324	332,0	306,9	0	-6,6	0,0
324	328,5	340,4	0	-6,6	0,0	320	328,0	294,9	0	-6,6	0,0
360	368,2	340,4	0	-6,6	0,0	252	259,9	214,1	4	-2,6	0,0
304	306,5	307,5	20	15,4	38,4	204	291,9	246,4	32	25,4	38,4
196	187,6	180,1	164	173,8	174,3	172	175,8	167,6	168	181,6	174,3
108	90,7	99,2	216	231,0	229,1	72	79,7	98,6	252	245,6	229,1
256	253,7	276,5	68	68,2	57,3	244	251,9	276,5	72	65,5	57,3
300	302,1	274,2	60	59,4	64,8	304	311,9	273,8	52	45,4	64,8
244	240,5	252,1	80	81,4	90,0	224	221,9	248,0	100	93,5	90,0
280	280,1	296,0	44	41,8	40,2	280	287,9	264,8	44	37,4	40,2
344	350,6	337,4	0	-6,6	3,0	344	352,0	323,4	0	-6,6	3,0
344	350,6	342,5	0	-6,6	3,5	240	247,9	217,9	0	-6,6	3,5
232	227,3	246,5	72	94,6	93,9	208	215,8	230,4	116	109,5	93,9
188	170,8	199,7	136	143,0	150,6	172	179,8	177,5	188	181,6	150,6
116	99,5	97,9	208	222,2	226,7	124	131,8	96,1	200	193,6	226,7
284	284,5	306,0	40	37,4	30,8	244	251,9	296,6	20	21,4	30,8
336	341,8	321,4	24	19,8	19,0	332	340,0	304,7	24	17,4	19,0
268	266,9	294,9	56	55,0	45,5	256	263,9	279,4	56	49,4	45,5
324	328,5	334,9	0	-6,6	0,0	324	332,0	316,1	0	-6,6	0,0
344	350,6	330,9	0	-6,6	15,0	340	348,0	317,8	0	-6,6	15,0
356	363,8	327,4	0	-6,6	13,0	264	271,9	220,2	0	-6,6	13,0
236	231,7	254,2	88	90,2	86,2	216	223,9	248,6	92	85,5	86,2
148	134,8	150,8	200	213,4	194,9	116	123,8	137,7	220	213,6	194,9
168	156,8	200,7	168	178,2	128,7	176	183,8	198,9	160	153,5	128,7
312	315,3	332,8	12	6,6	7,6	308	316,0	312,7	4	-2,6	7,6
324	328,5	293,9	36	33,0	38,5	320	328,0	280,6	32	25,4	38,5
324	328,5	331,0	0	-6,6	0,0	324	332,0	317,5	0	-6,6	0,0
324	328,5	334,6	0	-6,6	0,0	320	328,0	313,1	0	-6,6	0,0
344	350,6	330,1	4	-2,2	8,8	220	227,9	184,5	16	9,4	8,8
360	360,2	339,9	0	-6,6	0,0	288	295,9	274,7	0	-6,6	0,0
220	214,0	244,2	104	107,8	96,0	200	207,8	226,2	112	105,5	96,0
116	99,5	91,1	208	222,2	248,5	104	111,7	79,5	216	209,6	248,5
212	205,2	215,4	148	156,2	114,5	208	215,8	206,8	152	145,5	114,5